



Universidad  
Carlos III de Madrid

Departamento de ingeniería térmica y de fluidos

PROYECTO FIN DE CARRERA

DISEÑO BAJO NORMA  
TEMA DE  
INTERCAMBIADORES  
TUBO-CARCASA

Autor: Alejandro Arroyo Andrés

Tutor: Domingo José Santana Santana

Leganés, Diciembre 2014

Título: Diseño bajo norma TEMA de intercambiadores tubo-carcasa

Autor: Alejandro Arroyo Andrés

Director: Domingo José Santana Santana

EL TRIBUNAL

Presidente: \_\_\_\_\_

Vocal:  
\_\_\_\_\_

Secretario:  
\_\_\_\_\_

Realizado el acto de defensa y lectura del Proyecto Fin de Carrera el día 18 de Diciembre de 2014 en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE





# AGRADECIMIENTOS

A mi familia, mis padres Mercedes y Valeriano, y mis hermanos Jorge y Marcos, que siempre me han apoyado.

A mi tutor del proyecto, Domingo Santana, por su implicación en el mismo.



## RESUMEN

El Proyecto fin de carrera aborda la problemática en el diseño de intercambiadores de calor tubo-carcasa, al ser un proceso iterativo y muy costoso. Se presenta un medio alternativo a los software profesionales, para el cálculo de intercambiadores de calor.

La problemática se resuelve mediante la creación de una aplicación en Matlab que permite la obtención de un área factible, en una gráfica de la pérdida de carga en el intercambiador, en la que se encuentran todos los intercambiadores que cumplen las restricciones especificadas. Una vez delimitada el área, se puede calcular el intercambiador de mínimo coste que cumple las restricciones.

Se describen los componentes principales de los intercambiadores de calor, los parámetros de diseño y el procedimiento de cálculo.

La resolución del intercambiador se basa en el método de Bell-Delaware, que permite obtener una mejor solución que el método de Kern, utilizado antiguamente. Consiste en un proceso iterativo para la obtención de cada uno de los puntos que forman las curvas, que servirán para delimitar el área factible.

La aplicación de Matlab desarrollada permite obtener las características del intercambiador de mínimo coste total anualizado que cumple los requisitos demandados por el usuario y la normativa TEMA, así como realizar análisis de la influencia de diversos parámetros en el coste.

Palabras clave: intercambiador de calor, método Bell-Delaware, tubo-carcasa, área factible, mínimo coste, coste total anualizado, TAC, Matlab, TEMA.



# ABSTRACT

This Thesis looks into the difficulties of shell and tube heat exchangers design, being this an iterative and hard process. An alternative to professional software is presented for the calculation of heat exchangers.

This problem is solved by creating a Matlab application that allows obtaining a feasible region, on a pressure-drop diagram, where all the heat exchangers that meet the specified restrictions are. Once the region is delimited, minimum cost heat exchanger which meets the constraints can be calculated.

The main components of heat exchangers, design parameters and calculation procedure are going to be described.

The heat exchanger solution is based on the Bell-Delaware method, which allows to get a better solution than the Kern method, which was used in the past. It is an iterative process for obtaining each point that will form the curves which will define the feasible region.

The developed Matlab application allows getting the minimum total annualized cost heat exchanger which meets the demanded by user requirements and the TEMA regulations, specifications, so as analyzing the influence on the cost of several parameters.

Keywords: heat exchanger, Bell-Delaware method, shell and tube, feasible region, minimum cost, total annualized cost, TAC, Matlab, TEMA.



# ÍNDICE

Resumen/Abstract .....	2
Índice de figuras .....	8
Índice de tablas.....	11
1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS .....	12
1.1 Introducción .....	13
1.2 Objetivos .....	13
1.3 Estructura de la memoria.....	13
2. INTERCAMBIADORES DE CALOR.....	15
2.1 Clasificación según su construcción .....	16
2.1.1 Intercambiadores de tubo.....	16
2.1.2 Intercambiadores de placas .....	18
2.1.3 Intercambiadores con aletas .....	22
2.1.4 Intercambiadores regenerativos .....	23
2.2 Clasificación según el modo de transferencia de calor.....	24
2.2.1 Intercambiadores de contacto indirecto.....	24
2.2.2 Intercambiadores de contacto directo.....	24
2.3 Clasificación según la compactación.....	25
2.4 Clasificación según la disposición de los fluidos .....	27
2.4.1 Flujo en paralelo.....	27
2.4.2 Flujo en contracorriente.....	27
2.4.3 Flujo cruzado .....	27
2.5 Clasificación según el número de pasos .....	28
2.6 Clasificación según la fase de los fluidos.....	29
2.6.1 Líquido-gas .....	29
2.6.2 Líquido-líquido.....	30
2.6.3 Gas-gas .....	30
2.7 Clasificación en función del mecanismo de transferencia de calor .....	31
2.7.1 Condensadores.....	31



## DISEÑO BAJO NORMA TEMA DE INTERCAMBIADORES TUBO-CARCASA

2.7.2	Evaporadores.....	31
3.	SELECCIÓN DE INTERCAMBIADORES.....	33
3.1	Criterios de selección .....	34
3.1.1	Materiales de fabricación.....	34
3.1.2	Presión y temperatura de funcionamiento .....	35
3.1.3	Flujo másico.....	37
3.1.4	Disposición de los flujos .....	37
3.1.5	Parámetros de rendimiento .....	37
3.1.6	Tendencia al fouling .....	37
3.1.7	Tipos y fases de los fluidos .....	38
3.1.8	Requerimientos de mantenimiento, inspección, limpieza, ampliación y reparación. ....	38
3.1.9	Coste económico.....	39
3.1.10	Tecnologías de fabricación.....	39
3.1.11	Uso para el que está destinado.....	39
4.	INTERCAMBIADORES DE CALOR TUBO-CARCASA.....	41
4.1	Estándares de diseño .....	42
4.1.1	TEMA .....	42
4.1.2	ANSI/API Standard 660.....	44
4.2	Componentes principales de los intercambiadores tubo-carcasa.....	44
4.2.1	Tubos .....	44
4.2.2	Disposición de los tubos.....	49
4.2.3	Deflectores o <i>baffles</i> .....	51
4.2.4	Placa tubular o placa de tubos ( <i>tubesheet</i> ).....	56
4.2.5	Haz de tubos ( <i>tube bundle</i> ) .....	58
4.2.6	Carcasa .....	59
4.2.7	Pasos.....	62
4.2.8	Clasificación de intercambiadores tubo-carcasa en función del cabezal.....	65
4.2.9	Tipos de carcasa .....	68
4.3	Dilatación térmica diferencial .....	73
4.4	Coeficiente de transferencia de calor y pérdida de carga .....	73



## DISEÑO BAJO NORMA TEMA DE INTERCAMBIADORES TUBO-CARCASA

---

4.4.1	Coeficiente de transferencia de calor .....	73
4.4.2	Pérdida de carga.....	74
5.	DISEÑO .....	75
5.1	Termodinámica .....	76
5.1.1	Balance de energía .....	76
5.1.2	Eficiencia térmica .....	76
5.1.3	Coeficiente de transferencia de calor .....	84
5.2	Métodos de diseño .....	85
5.2.1	Método Kern .....	85
5.2.2	Método Bell-Delaware .....	86
5.2.3	Software comerciales.....	86
5.3	Método Bell-Delaware detallado .....	87
5.3.1	Cálculo de parámetros principales.....	88
5.3.2	Áreas de paso .....	92
5.3.3	Viscosidad de los fluidos .....	94
5.3.4	Factores de corrección .....	99
5.3.5	Coeficientes de convección.....	104
5.3.6	Pérdidas de carga .....	105
5.3.7	Precisión del método Bell-Delaware .....	107
6.	APLICACIÓN DE MATLAB.....	108
6.1	Consideraciones iniciales .....	109
6.2	Procedimiento general.....	109
6.3	Obtención de las curvas .....	110
6.4	El problema de Muralikrishna y Shenoy .....	116
6.4.1	Área factible .....	118
6.4.2	Coste del intercambiador.....	122
6.4.3	Comparativa de resultados obtenidos .....	126
6.4.4	Interfaz .....	128
7.	ANÁLISIS .....	133
7.1	Análisis de la influencia del <i>fouling</i> .....	134
7.1.1	Incremento del <i>fouling</i> .....	134



DISEÑO BAJO NORMA TEMA DE INTERCAMBIADORES TUBO-CARCASA

---

7.1.2	Disminución del fouling.....	135
ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB.....		137
REFERENCIAS .....		230
GLOSARIO DE TÉRMINOS .....		233



# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Intercambiador de calor de doble tubo. ....	17
Figura 2. Intercambiador de calor tubo-carcasa. ....	18
Figura 3. Intercambiador de calor de placas. ....	19
Figura 4. Intercambiador de calor de placas en espiral. ....	20
Figura 5. Intercambiador de calor de placas con serpentín. ....	21
Figura 6. Intercambiador de calor Lamella. ....	22
Figura 7. Intercambiador de calor de placas con aletas. ....	22
Figura 8. Diagrama de un intercambiador de calor regenerativo. ....	23
Figura 9. Diagrama de una torre de refrigeración. ....	25
Figura 10. Intercambiador de calor compacto. ....	26
Figura 11. Disposición de flujos en contracorriente. ....	27
Figura 12. Disposición de flujos cruzado, no mezclado-no mezclado. ....	28
Figura 13. Intercambiadores tubo-carcasa: 2 pasos por tubo-1 paso por carcasa (a) y 4 pasos por tubo-2 pasos por carcasa (b). ....	29
Figura 14. Intercooler aire-agua. ....	29
Figura 15. Intercooler aire-aire. ....	30
Figura 16. Condensador gas-líquido. ....	31
Figura 17. Caldera pirotubular. ....	32
Figura 18. Intercambiador de calor de vidrio. ....	35
Figura 19. Simulación de las temperaturas en el interior de un intercambiador tubo-carcasa. ....	36
Figura 20. Haz de tubos desmontado, en el que se puede apreciar fouling. ....	38
Figura 21. Designación de las secciones de intercambiadores tubo-carcasa, TEMA. ....	43
Figura 22. Corte de un tubo bimetálico. ....	44
Figura 23. Tubos con superficie mejorada. ....	45
Figura 24. Tubo microaleteado. ....	47
Figura 25. Diversas disposiciones de los tubos en una carcasa. ....	49
Figura 26. Layout triangular. ....	50
Figura 27. Layout cuadrado. ....	50
Figura 28. Flujo en un intercambiador dependiendo de los deflectores. ....	51
Figura 29. Diferentes cortes del deflector. ....	52
Figura 30. Deflectores de segmentación doble. ....	53
Figura 31. Deflectores de segmentación triple. ....	53
Figura 32. Requerimientos en la disposición de los deflectores de segmentación múltiple. ....	54





## DISEÑO BAJO NORMA TEMA DE INTERCAMBIADORES TUBO-CARCASA

Figura 33. Deflectores de disco y anillo.....	54
Figura 34. Intercambiador tubo-carcasa con deflector longitudinal. ....	55
Figura 35. Ejemplos de algunos deflectores patentados. ....	56
Figura 36. Deflector tipo Grimmas. ....	56
Figura 37. Placa tubular. ....	57
Figura 38. Intercambiador con doble placa tubular. ....	57
Figura 39. Haz de tubos. ....	59
Figura 40. Intercambiador con junta de expansión. ....	61
Figura 41. Placa de impacto.....	61
Figura 42. Disposición de las tiras de sellado en un intercambiador.....	62
Figura 43. Tipos de tiras de sellado. ....	62
Figura 44. Disposiciones típicas de los pasos por los tubos. (a) Tubos en U y (b) tubos rectos. A-A: vista frontal y B-B: vista trasera. ....	64
Figura 45. Cabezal fijo tipo L.....	65
Figura 46. Cabezal flotante tipo P. ....	66
Figura 47. Cabezal flotante tipo W. ....	67
Figura 48. Cabezal flotante tipo T.....	67
Figura 49. Cabezal flotante tipo S.....	67
Figura 50. Carcasa tipo TEMA E. ....	69
Figura 51. Carcasa tipo TEMA F. ....	70
Figura 52. Carcasa tipo TEMA G. ....	70
Figura 53. Carcasa tipo TEMA H. ....	71
Figura 54. Carcasa tipo TEMA J.....	72
Figura 55. Carcasa tipo TEMA K.....	72
Figura 56. Carcasa tipo TEMA X.....	73
Figura 57. Gráficas para la obtención de la efectividad en el método $\epsilon$ -NTU.....	78
Figura 58. Nomograma para el cálculo de la LMTD. ....	81
Figura 59. Gráficas para obtener el factor de corrección, F.....	83
Figura 60. Software de AspenTech, para el cálculo de intercambiadores de calor.....	87
Figura 61. Parámetros geométricos de un haz de tubos.....	91
Figura 62. Gráficas de la viscosidad en función de la temperatura para derivados del petróleo, TEMA.....	97
Figura 63. Diagrama para obtener la viscosidad a diversas temperaturas para distintos fluidos. ....	99
Figura 64. Parámetros para el cálculo de $j_{si}$ y $f_{si}$ . ....	101
Figura 65. Curvas de velocidades límite. ....	118
Figura 66. Curvas de diámetro máximo y longitud máxima de la carcasa. ....	119



## DISEÑO BAJO NORMA TEMA DE INTERCAMBIADORES TUBO-CARCASA

---

Figura 67. Curva de relación entre separación de los deflectores y diámetro de la carcasa máxima y mínima. ....	120
Figura 68. Área factible obtenida. ....	121
Figura 69. Área factible obtenida por Muralikrishna y Shenoy.....	122
Figura 70. Curvas de isocoste total anualizado del intercambiador. ....	124
Figura 71. Coste total anualizado mínimo para las restricciones de partida. ....	125
Figura 72. Características del intercambiador de menor coste total anualizado (TAC) obtenido en este trabajo. ....	125
Figura 73. Características del intercambiador de menor coste total anualizado (TAC) obtenido por Muralikrishna y Shenoy. ....	126
Figura 74. Características del intercambiador de menor coste total anualizado (TAC) obtenido por los autores de "Feasible design space for Shell-and-tube heat exchangers using the Bell-Delaware method" ....	126
Figura 75. Características del intercambiador de menor coste total anualizado (TAC) obtenido por los software de cálculo HTFS y B-JAC. ....	127
Figura 76. Interfaz del programa. ....	128
Figura 77. Panel para introducir datos en el programa. ....	129
Figura 78. Presentación de las características del intercambiador de mínimo coste obtenido mediante el programa. ....	130
Figura 79. Gráfica de "pérdida de carga en los tubos vs. pérdida de carga en la carcasa" para todas las restricciones obtenida mediante el programa. ....	131
Figura 80. Presentación de las características del intercambiador del punto de la gráfica seleccionado. ....	132
Figura 81. Intercambiador de mínimo coste obtenido con un aumento del fouling de un 25%. ....	134
Figura 82. Gráfica de "pérdida de carga en los tubos vs. pérdida de carga en la carcasa" para todas las restricciones con un aumento del fouling de un 25%. ....	135
Figura 83. Intercambiador de mínimo coste obtenido con una disminución del fouling de un 25%. ....	135
Figura 84. Gráfica de "pérdida de carga en los tubos vs. pérdida de carga en la carcasa" para todas las restricciones con una disminución del fouling de un 25%.....	136



# ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tipo de intercambiador recomendado en función de los fluidos de trabajo...	40
Tabla 2. Dimensiones de tubos normalizadas, Table RCB-2.21 [4].	46
Tabla 3. Espesor de los deflectores requerido, Table R-4.41 [4].	52
Tabla 4. Espesor de los deflectores requerido, Table CB-4.41 [4].	52
Tabla 5. Diámetros de carcasa normalizados, Table R-3.13 [4].	60
Tabla 6. Diámetros de carcasa normalizados, Table CB-3.13 [4].	60
Tabla 7. Valores de las constantes $m_1$ y $m_2$ para la obtención de $L_{bb}$ .	88
Tabla 8. Constantes para la ecuación de Sinnott [21] para una relación de $L_{tp}/D_t = 1.25$ .	88
Tabla 9. Factores de conversión de unidades para la viscosidad.	95
Tabla 10. Tabla adjunta al diagrama de la Figura 63. Diagrama para obtener la viscosidad a diversas temperaturas para distintos fluidos .	98
Tabla 11. Proceso a seguir para obtener las curvas de cada restricción.	110
Tabla 12. Constantes para el cálculo del coste total anualizado de un intercambiador tubo-carcasa.	123



# 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS



## 1.1 INTRODUCCIÓN

La motivación principal del proyecto es la creación de una aplicación que facilite el cálculo de intercambiadores de calor tubo-carcasa, al ser un proceso iterativo y costoso. Presentando una alternativa a los software comerciales existentes.

Se trata de una aplicación de Matlab que se utiliza para obtener la denominada área factible, en la que se encuentran todos los intercambiadores que cumplen los requerimientos especificados por el usuario así como la normativa de la “Tubular Exchanger Manufacturers Association” o TEMA, y a partir de la misma, la obtención del intercambiador de mínimo coste total anualizado o TAC.

Esta aplicación está limitada para el cálculo de carcasa tipo TEMA E, que son las más utilizadas. Consisten en un solo paso por la carcasa, con la entrada y salida del fluido de la carcasa en extremos opuestos del intercambiador. El proceso de cálculo se basará en el método de Bell-Delaware, ya que el resultado se aproxima más a la realidad que el método de Kern, utilizado antiguamente.

## 1.2 OBJETIVOS

El objetivo principal es el desarrollo de una aplicación en Matlab que sea capaz de resolver los problemas de dimensionado para intercambiadores tubo-carcasa tipo TEMA E.

La aplicación debe ser capaz de obtener las características del intercambiador de mínimo coste que cumple con los requerimientos solicitados por el usuario y con la normativa TEMA, si es que lo hubiera.

## 1.3 ESTRUCTURA DE LA MEMORIA

### 1 Introducción

Breve resumen del proyecto y los objetivos del mismo.

### 2 Intercambiadores de calor

Explicación de los diferentes tipos de intercambiadores de calor y sus características en función de diversas propiedades.

### 3 Selección de intercambiadores

Se explican ampliamente los criterios que se han de tener en cuenta a la hora de la elección de un intercambiador de calor u otro según la aplicación a la que está destinado y los distintos requerimientos térmicos y mecánicos.



#### **4 Intercambiadores de calor tubo-carcasa**

Descripción en detalle de los intercambiadores de calor tubo-carcasa, explicando sus diferentes componentes y características.

#### **5 Diseño**

Se describen los distintos parámetros que hay que tener en cuenta en el diseño de los intercambiadores de calor tubo-carcasa, así como las diferentes ecuaciones que rigen la transferencia de calor y la pérdida de carga en su interior según el método de Bell-Delaware.

#### **6 Aplicación de Matlab**

Descripción detallada del procedimiento seguido por la aplicación de Matlab para el cálculo de intercambiadores de calor tubo-carcasa.

#### **7 Análisis**

Utilización de la aplicación a modo de ejemplo, para comprobar la influencia del ensuciamiento o *fouling* en el coste y dimensiones de un intercambiador tubo carcasa.

#### **8 Código de las aplicaciones de Matlab**



## 2. INTERCAMBIADORES DE CALOR

DISEÑO BAJO NORMA TEMA DE INTERCAMBIADORES TUBO-CARCASA

---

Los intercambiadores de calor son dispositivos utilizados para la transferencia de energía interna térmica disponible entre dos o más fluidos a diferente temperatura. En la mayoría de los intercambiadores, los fluidos están separados por una superficie conductora de calor y no se mezclan.

Se utilizan para multitud de procesos en diversas industrias (recuperación de calor, procesamiento de petróleo, transporte, aire acondicionado, refrigeración, generación de energía y otras) así como en aplicaciones comunes (radiadores de automóviles, condensadores, evaporadores...).

Existen diferentes tipos de intercambiadores, cada uno con sus ventajas e inconvenientes, lo que implica que algunos son más indicados para unas determinadas condiciones de operación que otros.

Los intercambiadores de calor se pueden clasificar en distintos grupos, en función de su construcción, el modo de transferencia de calor, la compactación del intercambiador, la disposición de los fluidos, el número de pasos, la fase de los fluidos o el mecanismo de transferencia de calor.

## 2.1 Clasificación según su construcción

Según la geometría y el modo en el que los intercambiadores están contruidos, se pueden identificar distintos tipos.

### 2.1.1 Intercambiadores de tubo

#### 2.1.1.1 *Intercambiadores de doble tubo*

Están formados por dos tubos concéntricos, normalmente con un diseño en forma de U. Los fluidos discurren en contracorriente puro. Se pueden conectar en serie o en paralelo según las necesidades, lo que permite una alta flexibilidad en su diseño. Se suelen utilizar para fluidos a alta presión (hasta 14000 psi) o temperatura (hasta 600 °C), así como en fluidos con alto *fouling*. Presentan un área de intercambio de calor pequeña respecto al volumen ocupado.





*Figura 1. Intercambiador de calor de doble tubo.*

#### *2.1.1.2 Intercambiadores de tubo-carcasa*

Son el tipo de intercambiador más utilizado, se utilizan en diversas aplicaciones tales como enfriamiento de aceite, feed water heater (precalentador de agua en las centrales), condensadores...

Se componen principalmente de carcasa, tubos, *baffles* (deflectores) y cabezales anterior y posterior.

Proporcionan flujos de calor elevados en relación con su peso y volumen, es fácil de construir en una gran variedad de tamaños y es bastante fácil de limpiar y reparar. Además es versátil, y puede ser diseñado para cumplir prácticamente con cualquier aplicación.

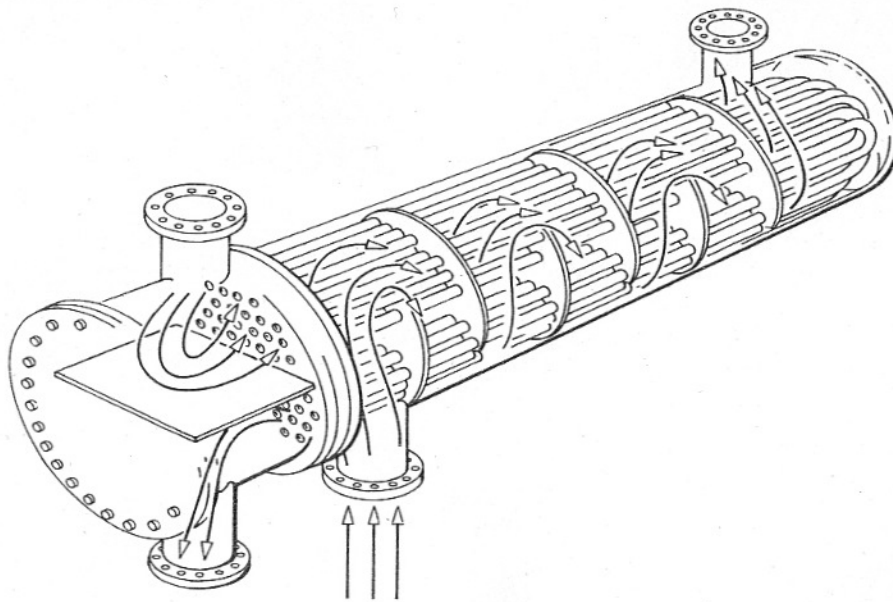


Figura 2. Intercambiador de calor tubo-carcasa.

Según la forma que presenten los tubos y su disposición se pueden diferenciar 3 tipos principales:

- De cabezal flotante
- Tubos en forma de U
- De cabezal fijo

Los intercambiadores tubo-carcasa serán explicados ampliamente más adelante.

## 2.1.2 Intercambiadores de placas

### 2.1.2.1 Placas (PHE)

En este tipo de intercambiadores, las corrientes de los fluidos están separadas por placas, que son láminas delgadas, rectangulares, con un diseño corrugado para facilitar la transferencia de calor. Los fluidos circulan paralelamente a las placas alternándose fluido caliente y fluido frío, de modo que a un lado de cada placa siempre circule el fluido frío y por el otro el caliente, además circulan en contracorriente puro al discurrir de manera vertical entre las placas. Las placas se encuentran empaquetadas de modo que permanezcan unidas y se sellan los canales por los que circulan los fluidos. Existen aberturas en las 4 esquinas de las placas, que permiten la comunicación entre las distintas placas y las corrientes de entrada y salida al intercambiador.

Las placas son corrugadas con el fin de aumentar el área superficial efectiva y provocar turbulencia en el fluido lo que permite obtener altos coeficientes de transferencia de

calor, aún a bajas velocidades y con moderadas caídas de presión. Las corrugaciones también incrementan la resistencia mecánica de las placas y favorecen su soporte mutuo.

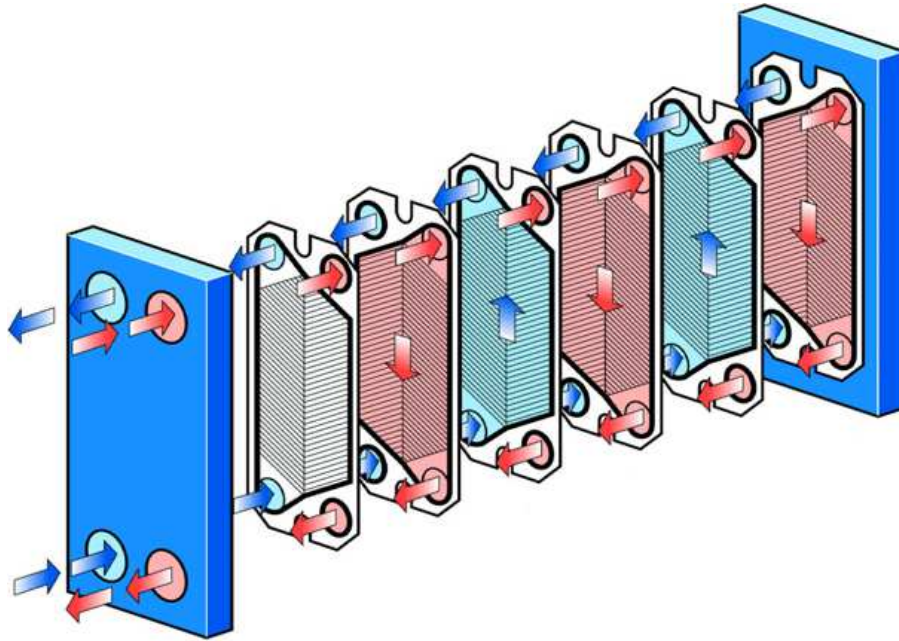


Figura 3. Intercambiador de calor de placas.

Los intercambiadores de placas presentan alta transferencia de calor y son compactos, presentando una gran área de contacto respecto al volumen ocupado. Además son propicios para fluidos con alta viscosidad, al presentar mayor facilidad para crear turbulencia en el fluido pero tienen que trabajar a bajas presiones.

#### 2.1.2.2 Intercambiadores en espiral (SHE)

Consisten en un par de láminas enrolladas alrededor de un eje formando pasajes paralelos en espiral por entre los cuales fluye cada sustancia. Los canales que se forman en la espiral se encuentran cerrados en los extremos para que los fluidos no se mezclen. Al fluir entre curvas se induce turbulencia en el fluido, lo que mejora la transferencia de calor y reduce el *fouling*. Estos equipos son muy utilizados para fluidos viscosos (de hasta 500000 cP), lodos y líquidos con sólidos en suspensión, así como en operaciones de condensación y vaporización.

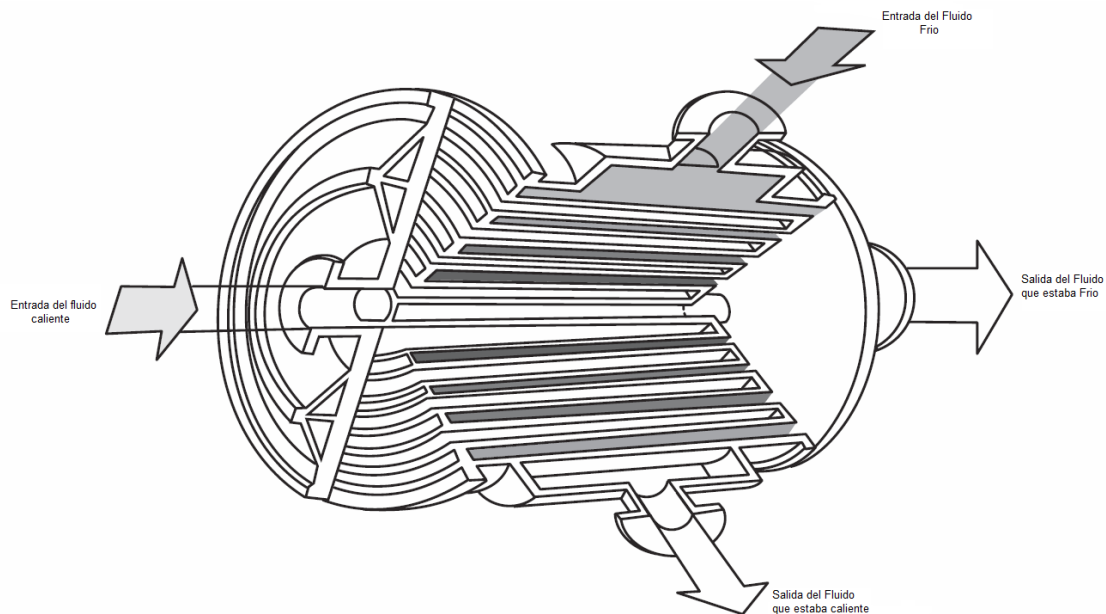


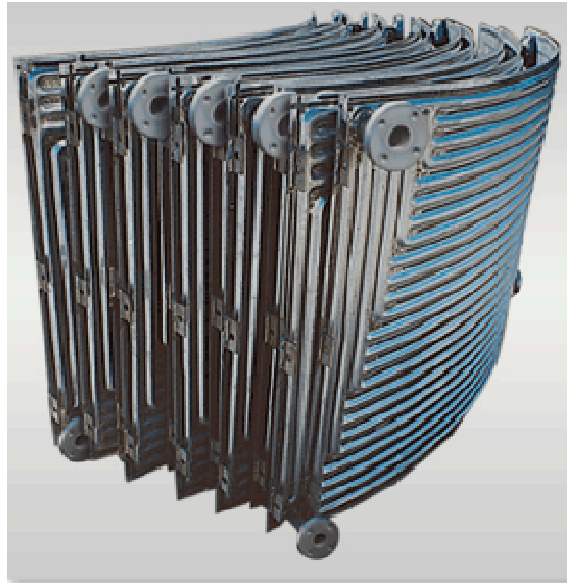
Figura 4. Intercambiador de calor de placas en espiral.

Entre sus características principales destacan que se emplean con flujo en contracorriente puro, no presentan problemas de dilatación diferencial, son compactos y pueden emplearse para intercambiar calor entre dos o más fluidos a la vez.

#### 2.1.2.3 Intercambiadores de placas con serpentín

Conocidos como *panel coils* o *plate coils*. Son relativamente baratos y se pueden construir en cualquier forma y grosor deseados. Consiste en una serie de placas con serpentines en su interior, por los que circula uno de los fluidos, que se encuentran sumergidas en un tanque en el que se encuentra el otro fluido. Las placas se construyen normalmente mediante soldadura.

Las principales ventajas que presentan son que se puede hacer circular cualquier tipo de fluido, el control de la velocidad, temperatura y transferencia de calor es preciso y no aparecen problemas en cuanto al mantenimiento, la limpieza o la contaminación de los fluidos.

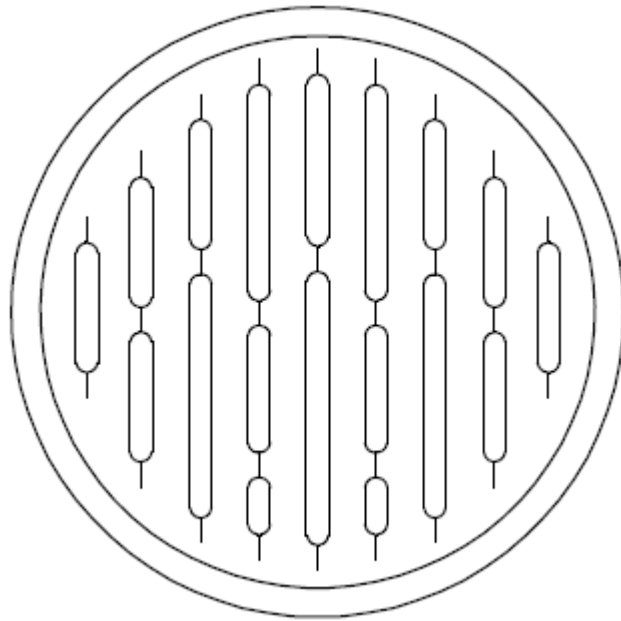


*Figura 5. Intercambiador de calor de placas con serpentín.*

Se utilizan en diversas aplicaciones industriales como en criogenia, procesos alimentarios o farmacéuticos, procesos químicos y otros.

#### *2.1.2.4 Intercambiadores Lamella*

Es un tipo de intercambiador soldado que combina la estructura del PHE con los intercambiadores tubo-carcasa sin *baffles*. En este diseño, los tubos son reemplazados por pares de placas finas paralelas con ancho variable, lo que produce largos y estrechos canales. El conjunto de placas se introduce en una carcasa similar a la de los intercambiadores tubo-carcasa y sólo se fija uno de los extremos para permitir la dilatación y contracción térmica. Además al no existir *baffles* la pérdida de carga es menor. Presenta una alta turbulencia y puede operar a altas presiones.



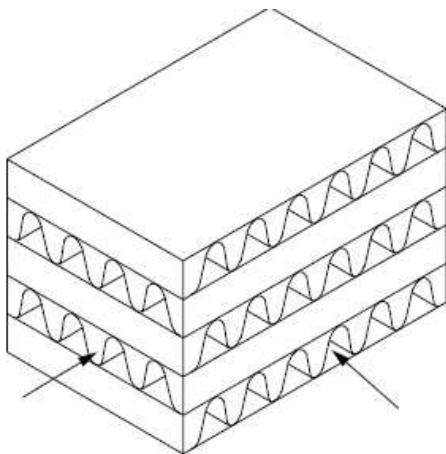
*Figura 6. Intercambiador de calor Lamella.*

Se utilizan solamente en casos especiales y el diseño lo realizan los proveedores.

### 2.1.3 Intercambiadores con aletas

En intercambiadores de calor con gases o algunos líquidos, si el coeficiente de transferencia de calor es demasiado bajo, es necesaria un área de intercambio de calor mayor para aumentar dicha transferencia. Esto se consigue mediante la adición de aletas a la superficie primaria.

Aquí se muestra un ejemplo de un intercambiador de placas con aletas.



*Figura 7. Intercambiador de calor de placas con aletas.*



#### 2.1.4 Intercambiadores regenerativos

Son un tipo de intercambiadores de calor donde el calor se almacena de forma intermitente en un medio de almacenamiento térmico tras hacer circular el fluido caliente por su interior, normalmente láminas de metal, para después hacer circular el fluido frío de modo que este pueda absorber el calor. Se pueden clasificar en regeneradores fijos y rotativos.

En los regeneradores fijos, los fluidos frío y caliente se alternan de modo que primero circula el fluido caliente y después el frío de modo cíclico. En los regeneradores rotativos, ambos fluidos circulan continuamente mientras que es el regenerador el que gira (a baja velocidad en comparación con la de los fluidos), funcionando con el mismo principio que los regeneradores fijos.

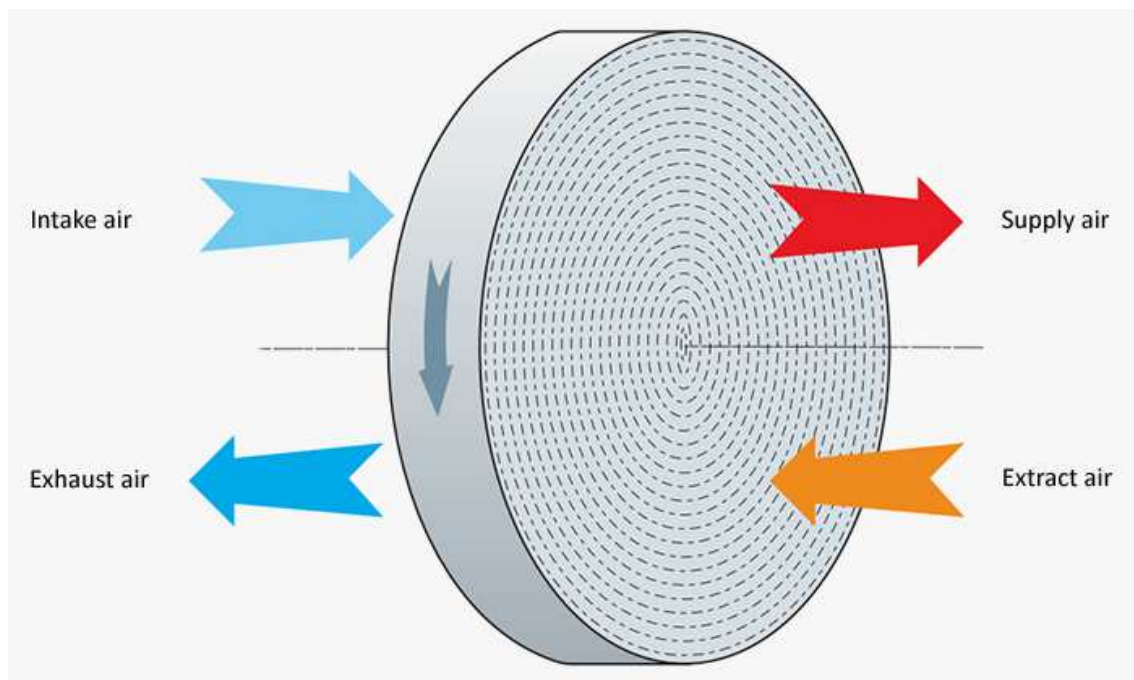


Figura 8. Diagrama de un intercambiador de calor regenerativo.

Se utilizan principalmente en las centrales con turbina de gas, donde el calor de los gases de escape es utilizado para aumentar la temperatura del aire comprimido antes de introducirlo en la cámara de combustión.



## 2.2 Clasificación según el modo de transferencia de calor

### 2.2.1 Intercambiadores de contacto indirecto

En este tipo de intercambiadores, las corrientes permanecen separadas y la transferencia de calor se produce a través de un muro impermeable. Se pueden clasificar en de transferencia directa, de almacenamiento y de lecho fluidizado. Entre los intercambiadores de transferencia directa se pueden encontrar los intercambiadores tubulares, los intercambiadores tubo-carcasa o los intercambiadores de placas.

### 2.2.2 Intercambiadores de contacto directo

En los intercambiadores de contacto directo, los dos fluidos no están separados, por lo que se mezclan, intercambian calor y después son separados. Debido a la ausencia de separación, se consigue una mayor aproximación de las temperaturas. Muy a menudo, en los intercambiadores de contacto directo, la transferencia de calor va también acompañada de una transferencia de masa. Entre los intercambiadores de contacto directo se encuentran los intercambiadores de fluidos inmiscibles, los intercambiadores líquido-gas y los intercambiadores líquido-vapor. Las torres de enfriamiento son un ejemplo de intercambiadores de contacto directo.



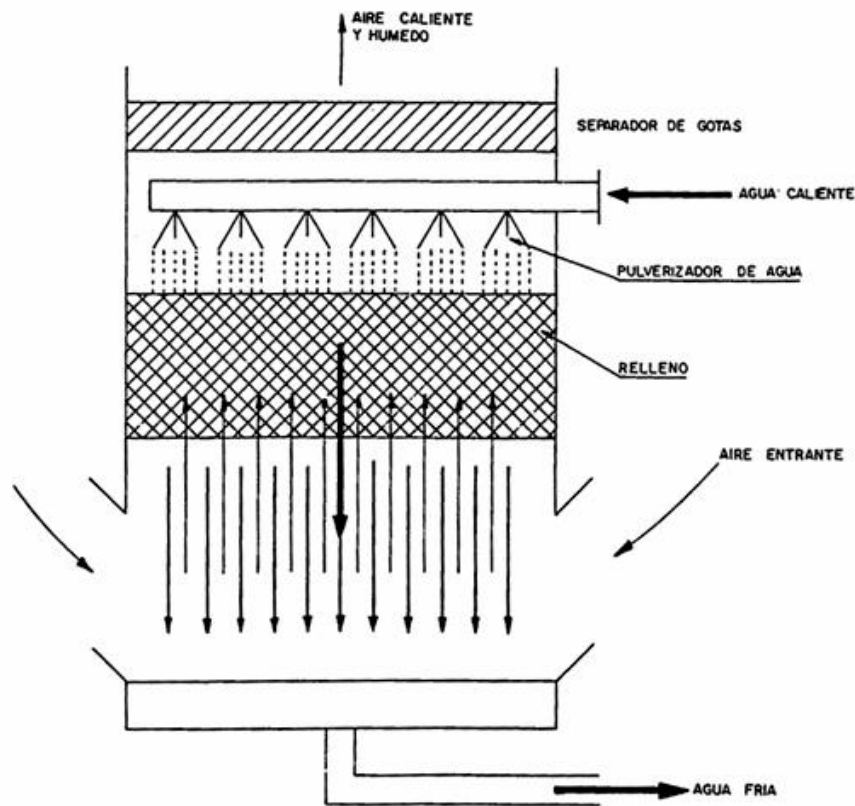


Figura 9. Diagrama de una torre de refrigeración.

### 2.3 Clasificación según la compactación

Los intercambiadores compactos son necesarios para aplicaciones en las que hay limitaciones en el peso o el tamaño de los intercambiadores. Los intercambiadores compactos tienen una densidad de superficie alta,  $\beta$ , de  $700 \text{ m}^2/\text{m}^3$  y mayores. Los intercambiadores de calor compactos utilizan una superficie compacta para uno o más fluidos. Permiten obtener efectividades térmicas mayores que los intercambiadores tubo-carcasa (de hasta un 95% en comparación con los típicos 60%-80% de los STHes).



Figura 10. Intercambiador de calor compacto.

Presentan diversas ventajas:

- Ocupan poco espacio en su almacenamiento
- Menor peso
- Transporte más fácil
- Menor requerimiento de cimientos
- Mejor control de temperatura

Sin embargo también presentan algunos inconvenientes:

- No existen estándares similares a los de las vasijas de contención de presión, aunque se están empezando a crearlos para intercambiadores refrigerados por aire y de placas aleteadas.
- Al ser conductos estrechos son susceptibles al *fouling* y no se pueden limpiar de manera mecánica, lo que limita los fluidos con los que pueden trabajar.

## 2.4 Clasificación según la disposición de los fluidos

### 2.4.1 Flujo en paralelo

En este tipo, ambos fluidos entran al intercambiador por el mismo extremo, fluyen en el mismo sentido y salen por el otro extremo. Termodinámicamente es una de las disposiciones más pobres, sin embargo, se emplea en algunos casos: cuando los materiales son muy sensibles a la temperatura, ya que la temperatura es más uniforme; cuando se desea mantener la misma efectividad del intercambiador sobre un amplio intervalo de flujo; cuando existe la posibilidad de que la temperatura del fluido caliente alcance su temperatura de solidificación y en procesos de ebullición, ya que favorece el inicio de la nucleación.

### 2.4.2 Flujo en contracorriente

En este tipo, ambos fluidos fluyen en paralelo pero en sentidos opuestos. Es el método más eficiente para las disposiciones de un sólo paso. En ciertos tipos de intercambiadores, el flujo contracorriente no es fácil de conseguir, debido a dificultades en la fabricación relacionadas con la separación de los fluidos en los extremos y el diseño de las entradas y salidas es complejo [1].

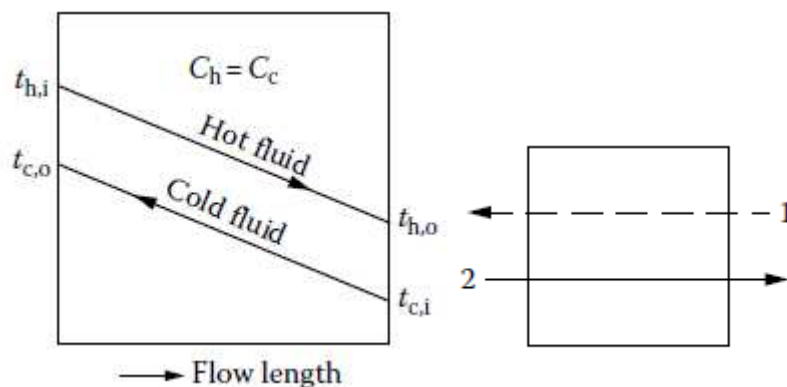


Figura 11. Disposición de flujos en contracorriente.

### 2.4.3 Flujo cruzado

En este tipo, los fluidos fluyen perpendicularmente entre ellos. Se pueden distinguir diferentes combinaciones para flujo cruzado en intercambiadores de un sólo paso:

- Ambos fluidos sin mezclar
- Un fluido sin mezclar y el otro mezclado
- Los dos fluidos sin mezclar

Una corriente se considera “no mezclada” cuando pasa a través de un conducto sin mezclarse con las corrientes adyacentes del mismo fluido, mientras que “mezclada” implica que dicho fluido discurre por un único conducto. Como ejemplo de disposición de flujo cruzado de ambos fluidos sin mezclar se encuentran los intercambiadores de placas aleteados, mientras que un ejemplo de fluido sin mezclar con otro mezclado puede encontrarse en los intercambiadores tubo carcasa de un sólo paso, en los que el fluido que discurre por el interior de los tubos es no mezclado y el que circula por la carcasa es mezclado.

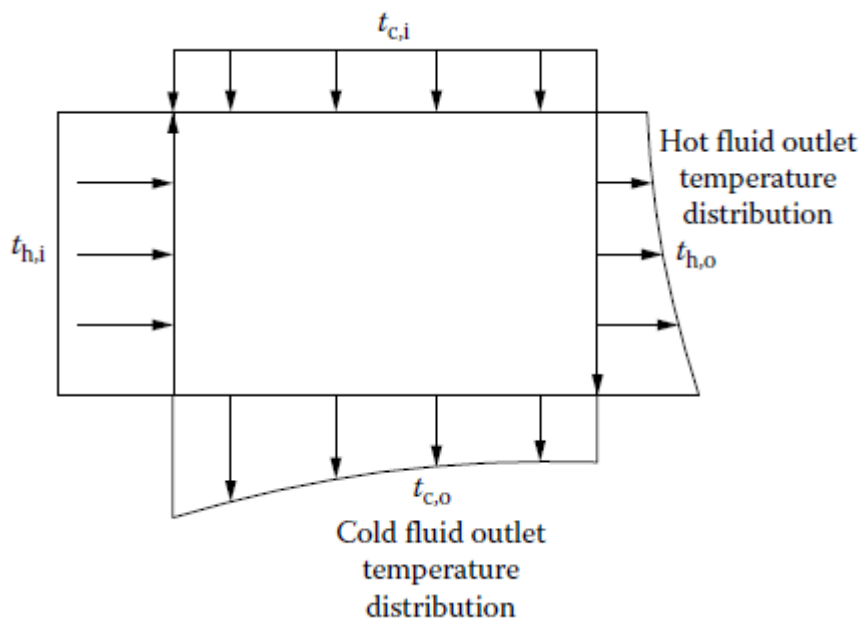


Figura 12. Disposición de flujos cruzado, no mezclado-no mezclado.

## 2.5 Clasificación según el número de pasos

Se pueden clasificar en un sólo paso o paso múltiple. Se considera que un fluido tiene un sólo paso si fluye a través del intercambiador su longitud total una sola vez. Es de paso múltiple si el fluido vuelve a pasar a través del intercambiador dos o más veces.

Es necesaria la realización de más de un paso cuando el diseño requerido para un intercambiador de un sólo paso con esos requerimientos resulta en un intercambiador demasiado largo, bajas velocidades de paso o una baja eficiencia. Según se incrementa el número de pasos, la disposición de los flujos se asemeja más a la de contraflujo puro.

## DISEÑO BAJO NORMA TEMA DE INTERCAMBIADORES TUBO-CARCASA

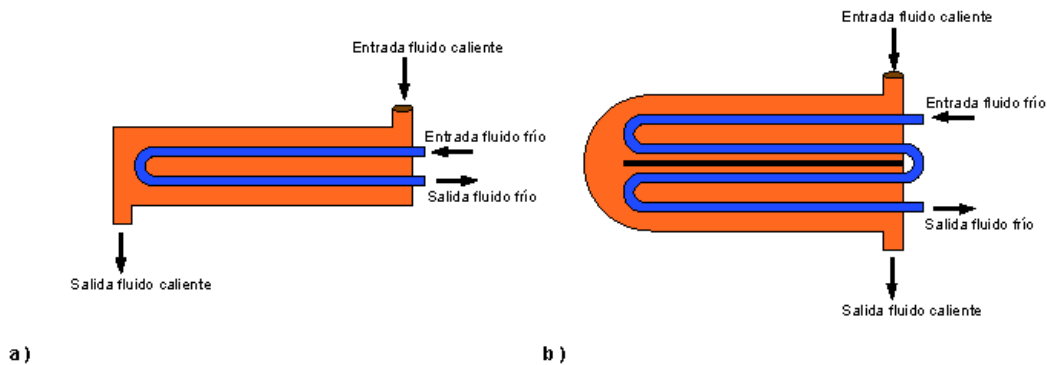


Figura 13. Intercambiadores tubo-carcasa: 2 pasos por tubo-1 paso por carcasa (a) y 4 pasos por tubo-2 pasos por carcasa (b).

## 2.6 Clasificación según la fase de los fluidos

### 2.6.1 Líquido-gas

Los intercambiadores líquido-gas son principalmente intercambiadores de calor de tubos aleteados con líquido en los tubos.

Los radiadores son los más intercambiadores principales de tipo líquido-gas que se encargan de enfriar el agua de refrigeración de los motores refrigerados por agua. También se utilizan en enfriadores de aceite de aeronaves, *intercoolers* y *aftercoolers* de compresores y condensadores y evaporadores de aires acondicionados. Normalmente el líquido es bombeado por los tubos con un alto coeficiente de convección, mientras que el aire fluye por el exterior con un coeficiente de convección menor. Se suelen utilizar aletas en la zona de los tubos por la que circula el gas, para aumentar el coeficiente de transferencia de calor.

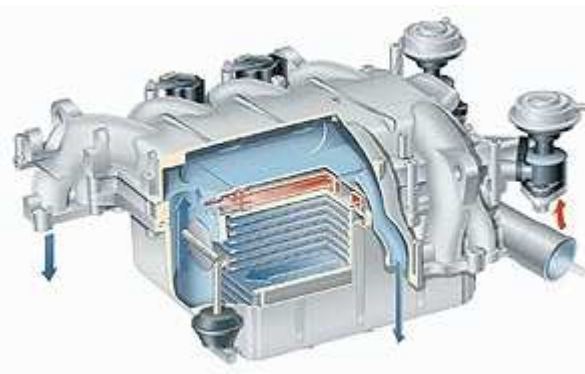


Figura 14. Intercooler aire-agua.

### 2.6.2 Líquido-líquido

La mayoría de los intercambiadores líquido-líquido son intercambiadores tubo-carcasa e intercambiadores de placas (PHE). Ambos fluidos son bombeados por el intercambiador por lo que el mecanismo principal de transferencia de calor es convección forzada. La densidad de los líquidos permite un alto coeficiente convectivo por lo que normalmente no es necesario el uso de aletas u otros dispositivos para aumentarlo. En algunas aplicaciones sí que se utilizan tubos aleteados o microaleteados para mejorar el coeficiente de transferencia de calor.

### 2.6.3 Gas-gas

Los intercambiadores gas-gas se encuentran principalmente en precalentadores recuperadores, regeneradores rotativos, *intercoolers* y *aftercoolers*. En muchos casos, uno de los gases es comprimido para aumentar la densidad mientras que el otro se mantiene a baja presión y densidad. El tamaño de los intercambiadores gas-gas es mucho mayor que el de los líquido-líquido debido a la diferencia de densidades y por tanto de coeficientes de convección.

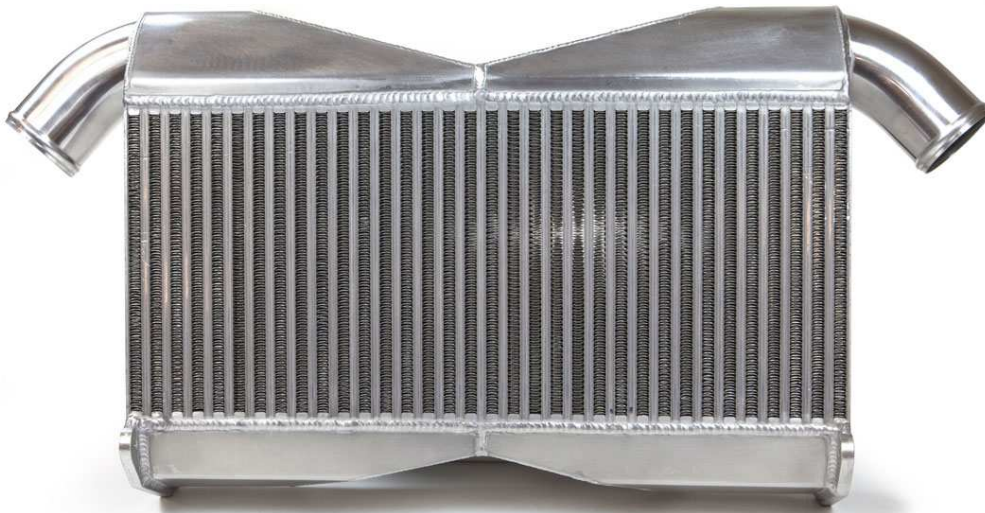


Figura 15. Intercooler aire-aire.



## 2.7 CLASIFICACIÓN EN FUNCIÓN DEL MECANISMO DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Los mecanismos principal de transferencia de calor de un fluido a otro utilizados son: la convección en una sola fase, natural o forzada, la convección natural o forzada en dos fases (condensación y evaporación) y combinación de convección y radiación. Cualquiera de estos mecanismos se puede dar individualmente o combinados en cualquiera de los fluidos del intercambiador.

Los intercambiadores basados en cambio de fase de los fluidos se pueden clasificar en condensadores y evaporadores.

### 2.7.1 Condensadores

Los condensadores pueden ser refrigerados tanto por líquido (agua) o gas (aire). Normalmente, en los condensadores refrigerados por agua, el fluido a condensar circula por el exterior de los tubos, mientras que en los refrigerados por aire el fluido a condensar circula por el interior de los tubos. Normalmente se utilizan aletas para el lado del intercambiador por el que circula el gas.

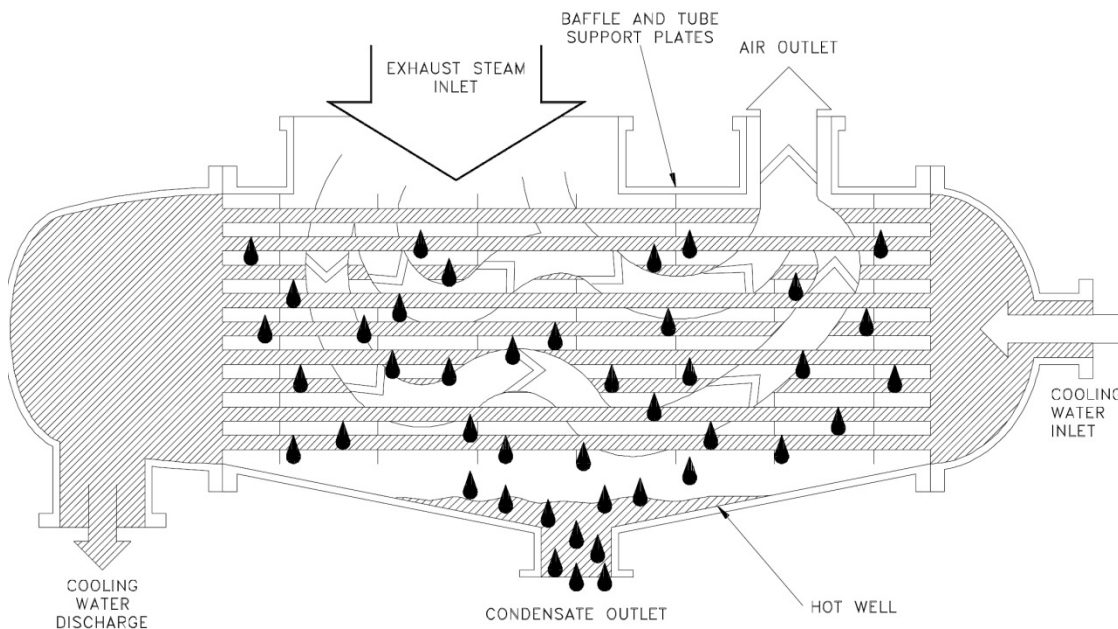


Figura 16. Condensador gas-líquido.

### 2.7.2 Evaporadores

Este grupo de intercambiadores se pueden subdividir en dos clases: calderas (*fired systems*) y *unfired systems*.

## DISEÑO BAJO NORMA TEMA DE INTERCAMBIADORES TUBO-CARCASA

*Calderas:* son los intercambiadores que utilizan productos de la combustión a muy alta temperatura pero a presión atmosférica para generar vapor. Pueden ser acuotubulares (en las que el agua circula por el interior de los tubos) o piro-tubulares (en las que los gases de escape circulan por el interior de los tubos).

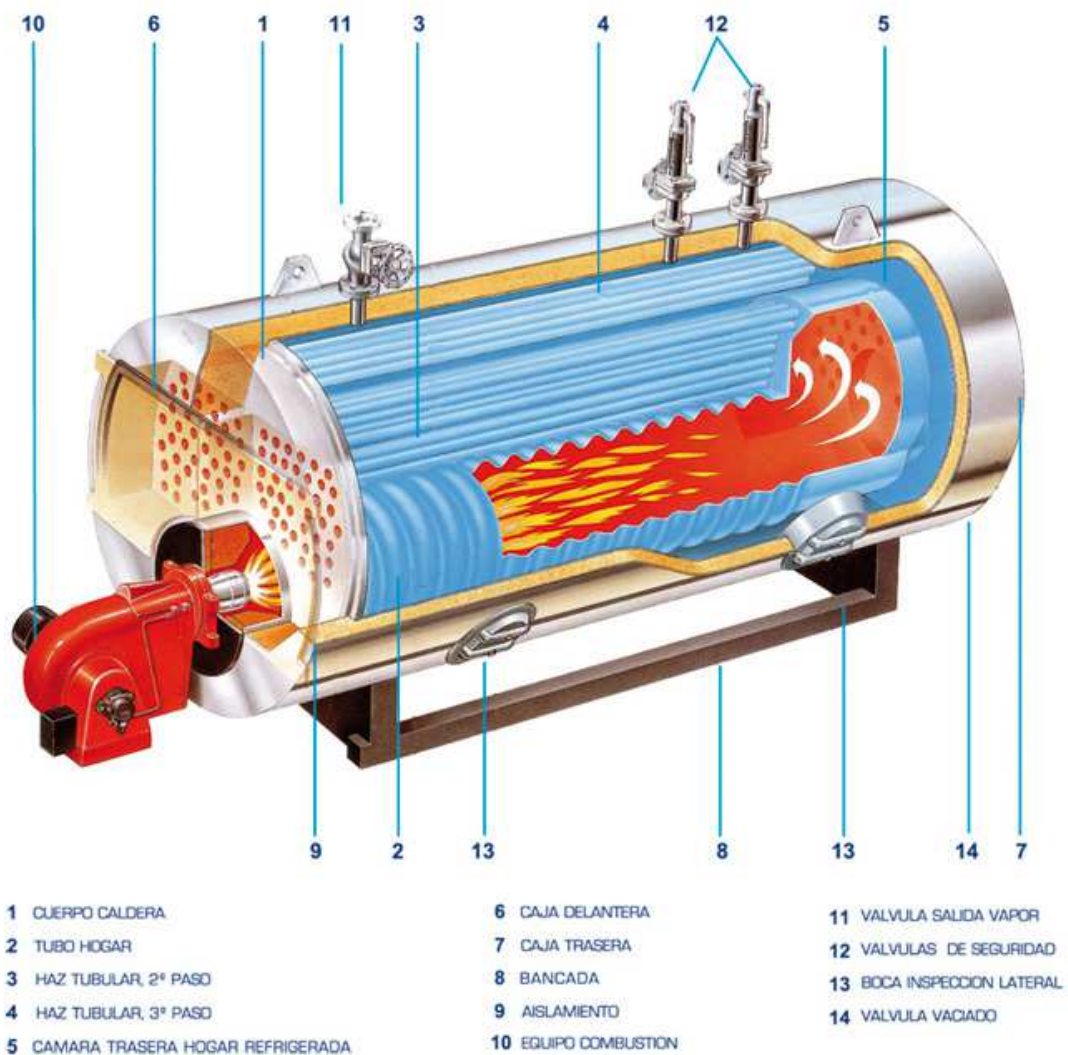


Figura 17. Caldera piro-tubular.

*Unfired systems:* en este grupo se encuentran una gran variedad de vaporizadores, desde vaporizadores de alta temperatura nucleares hasta gasificadores de muy baja temperatura criogénicos. Se utilizan en muchos procesos de la industria alimentaria.





### 3. SELECCIÓN DE INTERCAMBIADORES



Existen diversas alternativas a la hora de elegir un intercambiador de calor, pero sólo uno de ellos es el mejor para cada conjunto de condiciones.

Es necesario considerar las distintas solicitaciones a las que se verá sometido en su funcionamiento, así como la eficiencia térmica deseada o las propiedades de los fluidos que se van a utilizar.

### 3.1 CRITERIOS DE SELECCIÓN

Existen muchos criterios de selección, pero los principales son el tipo de fluido que se va a utilizar, las presiones y temperaturas de funcionamiento, la potencia térmica y el coste. Los fluidos involucrados en transferencia de calor pueden ser caracterizados por temperatura, presión, fase, propiedades físicas, toxicidad, corrosividad y la tendencia al ensuciamiento (*fouling*).

Las condiciones de funcionamiento para intercambiadores de calor pueden variar en un amplio rango y una gran cantidad de requerimientos son impuestos para su diseño.

Se deben considerar los siguientes aspectos cuando se selecciona un intercambiador:

- Materiales de fabricación
- Presión y temperatura de funcionamiento y el programa de temperaturas.
- Caudales máximos de los flujos
- Disposición de los flujos
- Parámetros de rendimiento (eficiencia térmica y pérdida de carga)
- Tendencias a producir ensuciamiento (*fouling*).
- Tipos y fases de los fluidos
- Requerimientos de mantenimiento, inspección, limpieza, ampliación y reparación.
- Coste económico
- Tecnologías de fabricación
- Modo de montaje (vertical u horizontal)
- Uso para el que está destinado

#### 3.1.1 Materiales de fabricación

Los materiales de fabricación del intercambiador y el recipiente de presión deben ser los apropiados para soportar la corrosión. Además, debe ser lo suficientemente resistente para soportar las temperaturas y presiones de trabajo. Los intercambiadores tubo-carcasa pueden ser fabricados en prácticamente cualquier material que sea necesario para evitar la corrosión, tanto no metales como vidrio, Teflón o grafito como

metales raros (titanio, zirconio, tantalio...). Los intercambiadores compactos con aletas normalmente son fabricados de metales con alta maleabilidad, mientras que los intercambiadores de placas requieren de materiales prensables o soldables.



*Figura 18. Intercambiador de calor de vidrio.*

### 3.1.2 Presión y temperatura de funcionamiento

#### 3.1.2.1 Presión

La presión de diseño es importante para determinar el grosor de la vasija de contención de la presión. Cuanto mayor es, más gruesa tendrá que ser esta y mayor ventaja presentará hacer circular al fluido de mayor presión por los tubos.

Las presiones de funcionamiento en los intercambiadores de placas (PHEs y SPHEs) están limitadas, debido a la dificultad de prensar placas del grosor necesario y a los materiales de las juntas en el caso de los PHEs. En los intercambiadores de tubo y carcasa con cabeza flotante y tubos con forma de U y en los intercambiadores de placas *Lamella* la presión de operación también está limitada.

#### 3.1.2.2 Temperatura

*Temperatura de diseño:* este parámetro es importante ya que indica si el material soporta la temperatura de funcionamiento y las cargas térmicas a las que será sometido el intercambiador. Para aplicaciones de baja temperatura y criogénicas debe presentar una alta tenacidad o resiliencia mientras que para aplicaciones de alta temperatura, el material debe presentar una alta resistencia a fluencia.

*Programa de temperaturas:* de este depende la temperatura media de muchos componentes en intercambiadores tubo-carcasa (STHE) como la carcasa, el haz de tubos y los *tubesheet*.

*Potencial térmico:* es la medida del potencial de transferencia de calor real que existe con las condiciones de diseño. Para ello se utiliza la diferencia de temperatura media logarítmica (LMTD). En los intercambiadores en los que el flujo no es contracorriente puro es necesaria la utilización de un factor de corrección,  $F$ . Se puede obtener analíticamente y mediante gráficas dependientes de la eficiencia térmica  $P$  y de la relación de capacidades caloríficas  $R$ .

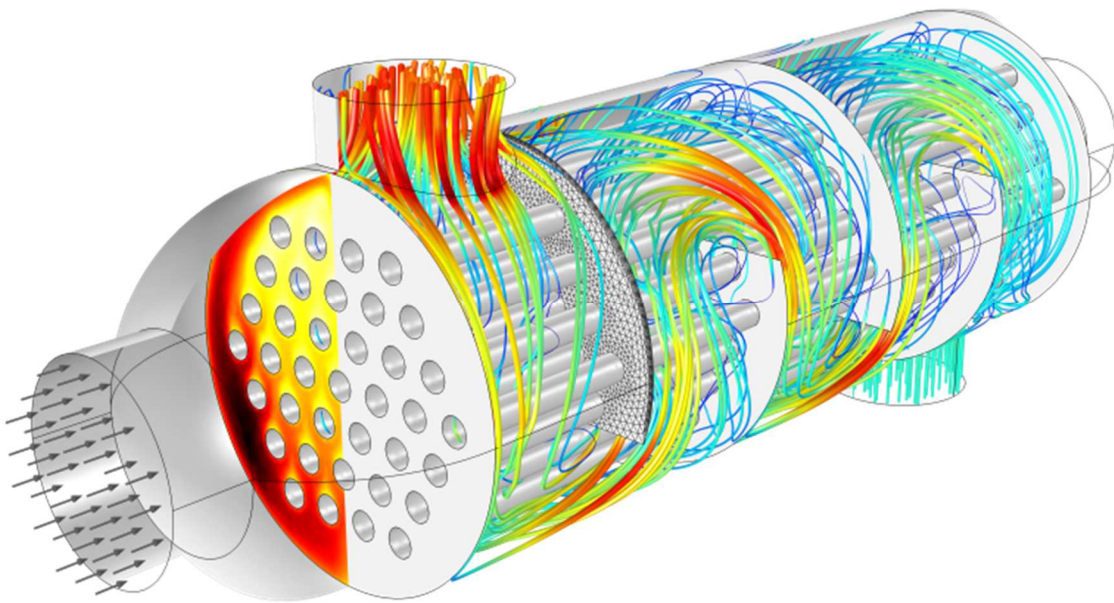


Figura 19. Simulación de las temperaturas en el interior de un intercambiador tubo-carcasa.

Los intercambiadores tubo-carcasa pueden ser diseñados para casi cualquier combinación de presión y temperatura. En algunos casos extremos, la alta presión puede ser una limitación a la hora de su fabricación debido al grosor del material y el peso del intercambiador final.

Los intercambiadores compactos se construyen con materiales más finos mediante soldadura, pegado... por lo que están limitados en temperatura y presión de trabajo. Los intercambiadores de placas y espiral sellados están limitados en presión y temperatura también, debido a la capacidad de las juntas y sellos.



### 3.1.3 Flujo másico

De la cantidad de flujo depende el área de paso necesaria. Es necesario aumentar el área para reducir la velocidad del flujo, dado que está limitada por la pérdida de carga, erosión... Además es necesaria en muchas ocasiones la imposición de una velocidad mínima para evitar la aparición de zonas estancas y minimizar el *fouling*.

### 3.1.4 Disposición de los flujos

La elección de una u otra disposición dependerá de la eficiencia del intercambiador necesaria, el tipo de intercambiador y otros parámetros de diseño.

### 3.1.5 Parámetros de rendimiento

*Eficiencia térmica:* si es necesaria una alta eficiencia térmica, se utilizan regeneradores o intercambiadores de placas soldadas, mientras que para eficiencias térmicas bajas se utilizan intercambiadores tubo-carcasa.

*Pérdida de carga:* la pérdida de carga puede estar limitada tanto por las bombas como limitaciones en el proceso. Los intercambiadores son diseñados para reducir la pérdida de carga todo lo necesario, ya que reduce el coste.

### 3.1.6 Tendencia al fouling

El *fouling* es la formación de depósitos no deseada en la superficie de intercambio de calor empeorando el coeficiente de intercambio de calor y aumentando la resistencia al paso del fluido, lo que conlleva un aumento de la pérdida de carga. Para compensar el fouling, es necesario aumentar la superficie de intercambio de calor, ya que esta disminuirá paulatinamente debido al fouling. En los intercambiadores tubo-carcasa, el fluido con mayor tendencia al fouling irá por los tubos, ya que son más fáciles de limpiar. Los intercambiadores compactos no se utilizan con fluidos con tendencia al fouling. Mientras que los intercambiadores de placas en espiral son idóneos para los fluidos con alto fouling, dado que la propia turbulencia generada en el fluido minimiza el fouling.



*Figura 20. Haz de tubos desmontado, en el que se puede apreciar fouling.*

### 3.1.7 Tipos y fases de los fluidos

Los fluidos líquidos presentan menos problemas al contar con una mayor densidad y mayor facilidad para el transporte, lo que mejora los coeficientes de transferencia de calor sin producirse una gran pérdida de carga [2].

### 3.1.8 Requerimientos de mantenimiento, inspección, limpieza, ampliación y reparación.

Es necesario tener en cuenta la accesibilidad de cada intercambiador para su limpieza, su ampliación o reparación y el mantenimiento. Los intercambiadores tubo-carcasa se pueden construir con un amplio rango de variaciones para facilitar su limpieza, además otros intercambiadores como los *Lamella* o los intercambiadores de placas soldadas son fáciles de abrir.

Las reparaciones de algunos componentes de los intercambiadores tubo-carcasa son sencillas, mientras que algunas partes, como la junta de expansión, pueden ser muy complicadas de reparar, además su ampliación en muchos casos es imposible. Los intercambiadores de placas son fáciles de reparar y son fácilmente ampliables también.



### 3.1.9 Coste económico

Hay que tener en cuenta dos costes principales, el coste de fabricación, y los costes de operación, que incluyen los costes de mantenimiento. En general, cuanto menor es la superficie de intercambio y menor es la complejidad del diseño menor es el coste de fabricación. El coste de operación se debe al coste del bombeo, véase bombas, compresores o ventiladores. Los costes de mantenimiento dependen principalmente de la corrosión y el fouling.

### 3.1.10 Tecnologías de fabricación

Son uno de los factores principales en la selección de un intercambiador. Son el coste principal en la fabricación así como en el mantenimiento y reparación [3].

### 3.1.11 Uso para el que está destinado

Según la aplicación para la que esté destinada es preferible el uso de unos tipos de intercambiador determinados. Se presenta una tabla en la que aparecen los más importantes.





## DISEÑO BAJO NORMA TEMA DE INTERCAMBIADORES TUBO-CARCASA

## Choice of Heat Exchanger Type for Intended Applications

Application	Remarks
Low-viscosity fluids	For high temperature/pressures, use STHE or double-pipe heat exchanger. Use PHE or LHE for low temperature/pressure applications.
Low-viscosity liquid to steam	Use STHE in carbon steel.
Medium-viscosity fluids	Use PHE or with high solids content, use SPHE.
High-viscosity fluids	PHE offers the advantages of good flow distribution. For extreme viscosities, the SPHE is preferred.
Fouling liquids	Use STHE with removable tube bundle. SPHE or PHE is preferred due to good flow distribution. Use PHE if easy access is of importance. Also consider Philips RODbaffle heat exchanger, <i>TWISTED TUBE®</i> heat exchanger and <i>Helixchanger®</i> heat exchanger, and <i>EMBaffle®</i> heat exchanger to improve flow velocity on the shellside, enhance heat transfer performance, and reduce fouling tendencies on shellside.
Slurries, suspensions, and pulps	SPHE offers the best characteristics. Also consider free flow PHE or wide gap PHE, or scraped surface heat exchanger.
Heat-sensitive liquids	PHE fulfills the requirements best. Also consider SPHE.
Cooling with air	Extended surface types like tube-fin heat exchanger or PFHE.
Gas or air under pressure	Use STHE with extended surface on the gas side or brazed plate-fin exchanger made of stainless steel or nickel alloys.
Cryogenic applications	Brazed aluminum plate-fin exchanger, coiled tube heat exchangers, or PCHE.
Vapor condensation	Surface condensers of STHE in carbon steel are preferred. Also consider SPHE or brazed plate heat exchanger.
Vapor/gas partial condensation	Choose SPHE.
Refrigeration and air conditioning applications	Finned tube heat exchangers, special types of PHEs, brazed PHE up to 200°C.
Air-air or gas-gas applications	Regenerators and plate-fin heat exchangers. Also consider STHE.
Viscous products, aseptic products, jam, food and meat processing, heat sensitive products and particulate laden products	Scraped surface heat exchanger.

*Note:* STHE, shell and tube heat exchanger; PHE, gasketed plate heat exchanger; SPHE, spiral plate heat exchanger; LHE, lamella heat exchanger; PCHE, printed circuit heat exchangers; CTHE, coiled tube heat exchanger; PFHE, plate-fin heat exchanger.

Tabla 1. Tipo de intercambiador recomendado en función de los fluidos de trabajo.





## 4. INTERCAMBIADORES DE CALOR TUBO-CARCASA

DISEÑO BAJO NORMA TEMA DE INTERCAMBIADORES TUBO-CARCASA

---

Son el tipo de intercambiador más utilizado, se utilizan en diversas aplicaciones tales como enfriamiento de aceite, condensadores, feed water heater (precalentador de agua en las centrales)...

Proporcionan flujos de calor elevados en relación con su peso y volumen, son relativamente fáciles de construir en una gran variedad de tamaños y bastante fáciles de limpiar y reparar. Además son versátiles, y pueden ser diseñados para cumplir prácticamente con cualquier aplicación.

## 4.1 Estándares de diseño

### 4.1.1 TEMA

Son los estándares fijados por los fabricantes de intercambiadores tubulares TEMA (Tubular Exchanger Manufacturers Association) [4]. Se siguen en la mayoría de los países del mundo para la construcción de intercambiadores tubo-carcasa. Se aplica a intercambiadores con diámetro de carcasa interior máximo de 60in. (1524mm), presión máxima de 3000psi (207 bar) y relación *diámetro interno carcasa \* presión* menor de 60000 psi (105000 mm bar). La intención de estas limitaciones es limitar el diámetro de los pernos utilizados en el ensamblaje del equipo y el espesor de la carcasa a 50.8 mm.

Cada una de las secciones del intercambiador se identifica con una letra dependiendo de su forma y características. De modo que los intercambiadores se identifican por 3 letras y las dimensiones del intercambiador. La primera letra designa el tipo de cabezal anterior, la segunda el tipo de carcasa y la tercera el tipo de cabezal posterior. Por lo que la descripción completa de estos equipos queda: diámetro de carcasa/longitud de tubos XXX, siendo X las letras que corresponden a cada tipo de componente. En el caso de los tubos en U, la longitud se toma hasta la tangente que pasa por el fondo de la U, en caso de ser otro tipo de tubos se toma sencillamente la longitud de los mismos.

## DISEÑO BAJO NORMA TEMA DE INTERCAMBIADORES TUBO-CARCASA

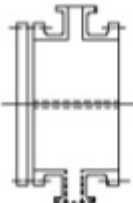
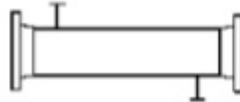

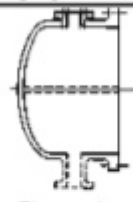

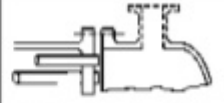
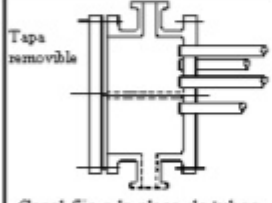
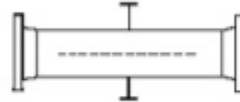

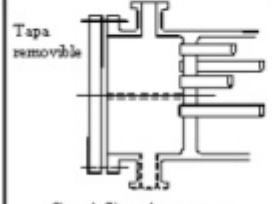
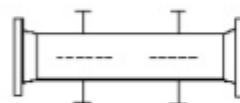
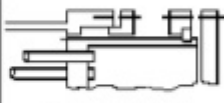


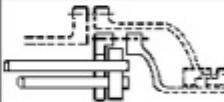
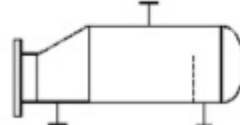

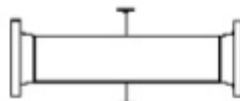
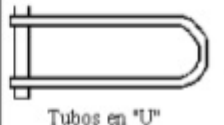

CABEZALES ANTERIORES: ESTACIONARIOS O FIJOS		TIPOS DE CARCAZAS		CABEZALES POSTERIORES	
<b>A</b>	 Canal y tapa removibles	<b>E</b>	 Un solo paso	<b>L</b>	 Cabezal fijo tipo "L"
<b>B</b>	 Tipo sombrero	<b>F</b>	 Dos pasos con deflector longitudinal	<b>M</b>	 Cabezal fijo tipo "M"
<b>C</b>	 Tapa removible Canal fijo a la placa de tubos	<b>G</b>	 Flujo distribuido	<b>N</b>	 Cabezal fijo tipo "N"
<b>N</b>	 Tapa removible Canal fijo a la carcasa	<b>H</b>	 Doble flujo distribuido	<b>P</b>	 Flotante externo
<b>D</b>	 Especial para altas presiones	<b>J</b>	 Flujo dividido	<b>S</b>	 Anillos divididos
		<b>K</b>	 Reservidor tipo kettle	<b>T</b>	 Tracción continua
		<b>X</b>	 Flujo cruzado	<b>U</b>	 Tubos en "U"
				<b>W</b>	 Flotante sellado externamente

Figura 21. Designación de las secciones de intercambiadores tubo-carcasa, TEMA.

Las clases R, C y B se han combinado en la sección RCB.

-TEMA B: utilizado para procesos químicos, más riguroso que el TEMA C, pero menos que el R.

-TEMA C: es el más utilizado industrialmente y procesos comerciales, normalmente para procesos con requerimientos no muy elevados.

## DISEÑO BAJO NORMA TEMA DE INTERCAMBIADORES TUBO-CARCASA

-TEMA R: es el de más riguroso, normalmente se utiliza en aplicaciones de procesos del petróleo y relacionados.

#### 4.1.2 ANSI/API Standard 660

Este estándar americano [5] proviene del ISO 16812:2002, se utiliza en las industrias del gas natural y el petróleo, para especificar requerimientos, diseño, selección de materiales, fabricación, inspección, pruebas y preparación de envíos para los intercambiadores tubo-carcasa.

### 4.2 Componentes principales de los intercambiadores tubo-carcasa

#### 4.2.1 Tubos

En los intercambiadores tubo-carcasa se utilizan exclusivamente tubos de sección circular. Dado que la transferencia de calor tiene lugar en la superficie de los tubos, es importante seleccionar las variables geométricas correctas de cara a obtener un buen rendimiento [6]. Entre las variables a seleccionar destacan el diámetro exterior, el espesor del tubo, la separación entre tubos (*tube pitch*) y la distribución de los tubos (*tube layout*). Los tubos tienen que soportar diversos requerimientos:

- Temperatura de trabajo a ambos lados del tubo.
- Esfuerzos térmicos debido a las diferencias entre las dilataciones térmicas de la carcasa y el haz de tubos.
- Corrosión a la que se ven sometidos por parte de ambos fluidos.

Existen dos tipos de tubos, rectos y tubos en U. Además, los tubos se pueden clasificar en:

- Tubos lisos
- Tubos aleteados
- Tubos bimetálicos, se utilizan dos metales diferentes, uno en el interior y otro en el exterior, para solventar problemas de corrosión.



Figura 22. Corte de un tubo bimetálico.

-Tubos con superficie mejorada (*enhanced surface*), se utilizan cuando uno de los dos fluidos tiene un coeficiente de transferencia de calor bajo. En algunos casos tanto la superficie interior como la exterior se tratan para mejorar los coeficientes convectivos.



Figura 23. Tubos con superficie mejorada.

#### 4.2.1.1 Diámetro

El tamaño de los tubos se especifica mediante el diámetro exterior y el grosor del tubo. Los tubos con menor diámetro presentan mayor coeficiente de transferencia y resultan en intercambiadores más compactos. Sin embargo, un diámetro mayor permite una mejor limpieza y son necesarios cuando la pérdida de carga admisible en los tubos es pequeña. La mayoría de los tubos utilizados tienen un diámetro exterior entre  $\frac{1}{4}$  in. (6.35 mm) y 2 in. (50.8 mm). Las dimensiones estándar de TEMA están especificadas en la siguiente tabla.



## DISEÑO BAJO NORMA TEMA DE INTERCAMBIADORES TUBO-CARCASA

BARE TUBE DIAMETERS AND GAGES			
O.D. In. (mm)	Copper and Copper Alloys	Carbon Steel, Aluminum and Aluminum Alloys	Other Alloys
	B.W.G.	B.W.G.	B.W.G.
1/4 (6.4)	27	-	27
	24	-	24
	22	-	22
3/8 (9.5)	22	-	22
	20	-	20
	18	-	18
1/2 (12.7)	20	-	20
	18	-	18
5/8 (15.9)	20	18	20
	18	16	18
	16	14	16
3/4 (19.1)	20	16	18
	18	14	16
	16	12	14
7/8 (22.2)	18	14	16
	16	12	14
	14	10	12
	12	-	-
1 (25.4)	18	14	16
	16	12	14
	14	-	12
1-1/4 (31.8)	16	14	14
	14	12	12
1-1/2 (38.1)	16	14	14
	14	12	12
2 (50.8)	14	14	14
	12	12	12

Tabla 2. Dimensiones de tubos normalizadas, Table RCB-2.21 [4].

Los diámetros más utilizados son 3/8 in. y 1/2 in., que presentan los mejores rendimientos y son los más económicos [7]. Para fluidos “limpios” se utilizan 1/4 in. (6.35 mm) mientras que para limpieza mecánica el menor tamaño práctico es 3/4 in. (19.05 mm). Para fluidos en los que se espera fouling se utilizan tubos de diámetro 1 in. y superiores [8].

#### 4.2.1.2 Espesor

Los espesores de tubos estándar aparecen en la tabla anterior. El grosor del tubo se debe comprobar para la presión interior y exterior y para la máxima diferencia de presiones a los dos lados del tubo. Excepto cuando la presión es el factor limitante, el espesor del tubo se selecciona en función de la corrosión, los problemas de vibración, coste y dimensiones estándar [9].

En el caso de los tubos en U, el espesor del tubo en el radio exterior disminuye, por lo que es necesario que el tubo tenga un espesor inicial mayor antes de doblarlo.

$$t_o = t_1 \left( 1 + \frac{d}{4R_b} \right)$$

con

$t_o$ : espesor del tubo inicial

$t_1$ : espesor mínimo especificado por TEMA para un tubo recto diseñado para los mismos requerimientos de presión y temperatura

$d$ : diámetro del tubo exterior

$R_b$ : radio de curvatura

#### 4.2.1.3 Aletas

En algunos intercambiadores tubo-carcasa se emplean tubos microaleteados para incrementar la superficie de contacto del lado de la carcasa cuando el coeficiente de transferencia de calor exterior es bajo en comparación con el del interior del tubo. En general se emplean unas aletas de una altura inferior a 1/16 in. (1.59 mm). La cantidad de aletas por unidad de longitud típica oscila entre 19 y 40 aletas/in. (748-1575 aletas/m). El área de contacto es de 2.5 a 3.5 veces la de un tubo liso [6].



Figura 24. Tubo microaleteado.



#### 4.2.1.4 Longitud

Dada un área determinada, el intercambiador más económico posible se basa en tubos largos y un diámetro de carcasa pequeño. Sin embargo existen restricciones en la longitud máxima ya que son más difíciles de instalar y el mantenimiento es más caro debido a limitaciones en el espacio, además de que la pérdida de carga en los tubos es mayor. De modo que se suele optar por intercambiadores más cortos y con un diámetro de carcasa mayor a pesar de su mayor precio. Las longitudes estándar de TEMA son 96, 120, 144, 196 y 240 in. (2438.4, 3048, 3657.6, 4978.4, 6096 mm) [5].

#### 4.2.1.5 Tecnologías de fabricación

Los tubos son soldados o continuos. Los tubos soldados son enrollados a partir de material plano y son soldados de manera precisa. Los tubos continuos se suelen fabricar por extrusión o *hot piercing*.

#### 4.2.1.6 Número de tubos

El número de tubos depende del caudal másico y la pérdida de carga admisible. Se selecciona el número de tubos de modo que la velocidad del fluido por su interior se encuentre entre 3 y 8 ft/s (0.9 y 2.4 m/s) y la velocidad por el interior de la carcasa entre 2 y 5 ft/s (0.6 y 1.5 m/s) [6]. El límite de velocidad inferior es para limitar el *fouling* y la sedimentación de las partículas cuando los fluidos contienen arenas u otro tipo de partículas, mientras que el límite superior es para disminuir la erosión y corrosión en el interior del tubo y para evitar la vibración en el lado de la carcasa.

#### 4.2.1.7 Tube count

Se denomina así al número máximo de tubos que entran en una determinada carcasa una vez conocido su diámetro. Depende de diversos factores:

- Diámetro de carcasa
- Diámetro de los tubos externos
- Distancia entre tubos (*tube pitch*)
- Formación de los tubos (triangular, cuadrada)
- Separación entre la carcasa y el haz de tubos
- Tipo de intercambiador (de tubos en U, cabeza flotante o fijos)
- Número de pasos de los tubos
- Presión de funcionamiento
- Deflectores, sellos y otros dispositivos que ocupan espacio en la carcasa.

El método convencional es mediante dibujo pero es demasiado lento y lleva a errores. Existen tablas que contienen diversas combinaciones estándar pero se puede calcular



mediante una aproximación matemática ideada por Phadke [10], que permite calcular el número de tubos en función de la disposición de éstos.

#### 4.2.2 Disposición de los tubos

##### 4.2.2.1 Separación

Conocido como *tube pitch* es la separación existente entre dos tubos consecutivos. Una separación pequeña aumenta la transferencia de calor del lado de la carcasa y permite construir un intercambiador más compacto, mientras que una separación mayor reduce la pérdida de carga y el fouling en la carcasa y facilita su limpieza. La separación mínima es de 1.25 veces el diámetro externo de los tubos, dado que con una separación menor la placa existente entre dos agujeros consecutivos (en los *tubesheet*) se vuelve demasiado débil.

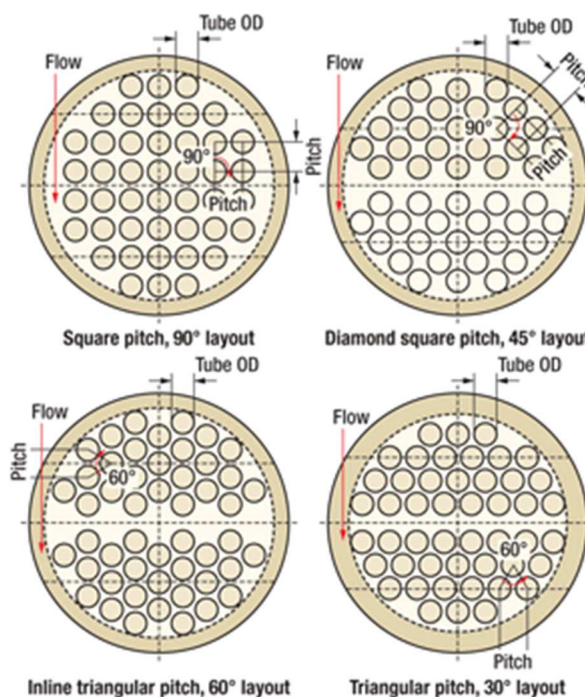


Figura 25. Diversas disposiciones de los tubos en una carcasa.

##### 4.2.2.2 Layout

Es la forma que toma la disposición de los tubos. Existen cuatro tipos estándar: triangular (30°), triangular girada (60°), cuadrada (90°) y cuadrada girada (45°). Los ángulos se toman en referencia a la dirección del flujo. Para la misma separación y flujo, en orden creciente de pérdida de carga y coeficiente de transferencia de calor se encuentran 90°, 60°, 45° y 30°.

#### 4.2.2.2.1 Triangular y triangular girado

Esta disposición permite un diseño más compacto, al tener un mayor coeficiente de transferencia. Se pueden introducir hasta un 15% más de tubos que en una disposición cuadrada [9].

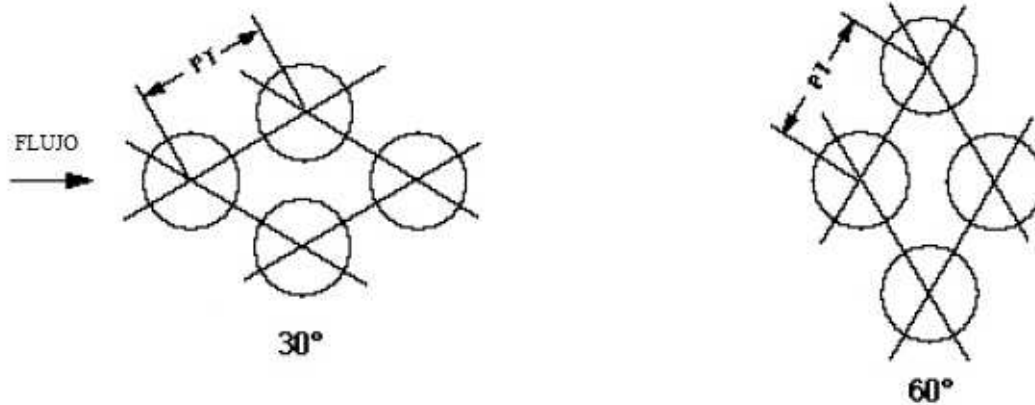


Figura 26. Layout triangular.

#### 4.2.2.2.2 Cuadrada y cuadrada girada

Cuando es necesario realizar una limpieza mecánica se utiliza una disposición cuadrada. También es conveniente cuando existe una limitación en la pérdida de carga de la carcasa ya que la pérdida de carga es menor que en disposiciones triangulares así como el coeficiente de transferencia de calor.

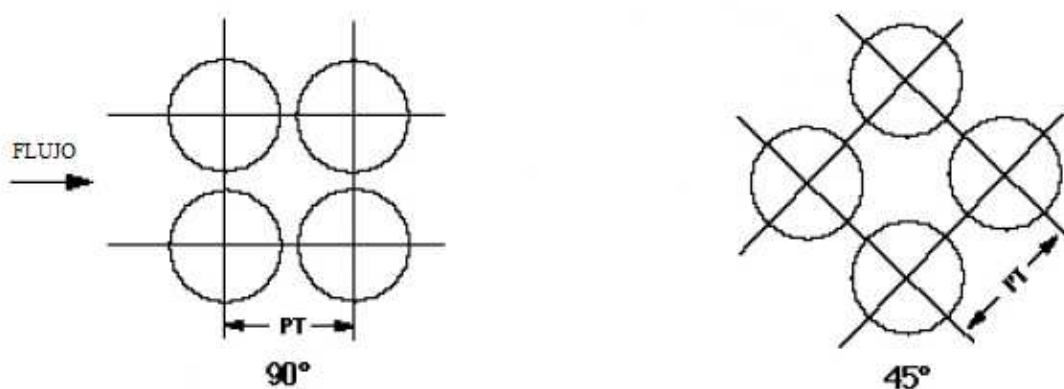


Figura 27. Layout cuadrado.

Shah [6] sugiere el uso de layouts cuadrados para aplicaciones en las que la pérdida de carga en la carcasa es una limitación y para recalentadores (reboilers), ya que el vapor fluye mejor.

### 4.2.3 Deflectores o *baffles*

Los deflectores pueden ser transversales o longitudinales. Los longitudinales se utilizan cuando se requieren dos o más pasos por carcasa, son denominados divisores de paso. Los deflectores transversales tienen la función de que el fluido circule de manera normal a los tubos para aumentar la turbulencia y la transferencia de calor.

#### 4.2.3.1 Deflectores transversales

Existen diversos tipos de deflectores transversales.

##### 4.2.3.1.1 Deflectores segmentados

Son discos circulares segmentados. La parte del disco eliminada se denomina ventana del deflector y se expresa como un porcentaje del diámetro de la carcasa, se calcula dividiendo la altura de la ventana entre el diámetro. El coeficiente de transferencia y la pérdida de carga dependen de manera importante del corte del deflector (*baffle cut*). Oscila entre el 20% y el 49%, siendo lo más común un corte de entre un 20% y un 25%, ya que el óptimo se encuentra en torno al 20%.

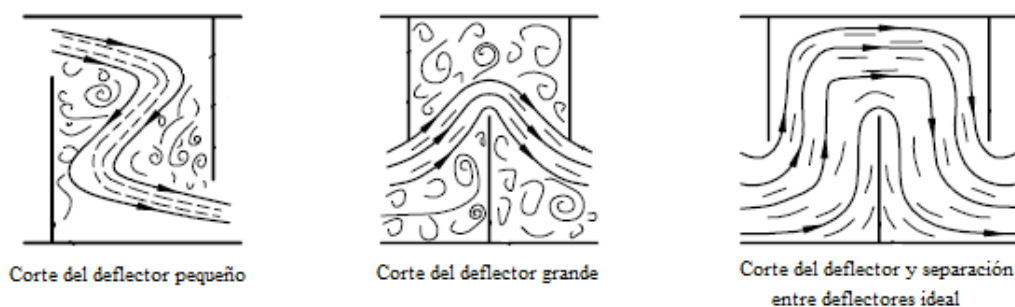


Figura 28. Flujo en un intercambiador dependiendo de los deflectores.

**Separación entre deflectores:** se utilizan unas separaciones entre  $1/5$  y  $1$  veces el diámetro de la carcasa y el óptimo se encuentra entre el 40% y el 50% del diámetro. Las separaciones a la entrada y la salida de la carcasa suelen ser mayores debido a los acoplamientos ya que requieren un mayor espacio.

**Grosor de los deflectores:** TEMA especifica los grosores mínimos para varios diámetros de carcasa y separaciones de deflectores. Tabla R-4.41 de TEMA con los grosores en in. (mm) para distintos diámetros de carcasa y distancia entre deflectores centrales.

## DISEÑO BAJO NORMA TEMA DE INTERCAMBIADORES TUBO-CARCASA

BAFFLE OR SUPPORT PLATE THICKNESS											
Dimensionis in Inches (mm)											
Nominal Shell ID		Plate Thickness									
		Unsupported tube length between central baffles. End spaces between tubesheets and baffles are not a consideration.									
		24 (610) and Under		Over 24 (610) to 36 (914) Inclusive		Over 36 (914) to 48 (1219) Inclusive		Over 48 (1219) to 60 (1524) Inclusive		Over 60 (1524)	
6-14	(152-356)	1/8	(3.2)	3/16	(4.8)	1/4	(6.4)	3/8	(9.5)	3/8	(9.5)
15-28	(381-711)	3/16	(4.8)	1/4	(6.4)	3/8	(9.5)	3/8	(9.5)	1/2	(12.7)
29-38	(737-965)	1/4	(6.4)	5/16	(7.5)	3/8	(9.5)	1/2	(12.7)	5/8	(15.9)
39-60	(991-1524)	1/4	(6.4)	3/8	(9.5)	1/2	(12.7)	5/8	(15.9)	5/8	(15.9)
61-100	(1549-2540)	3/8	(9.5)	1/2	(12.7)	5/8	(15.9)	3/4	(19.1)	3/4	(19.1)

Tabla 3. Espesor de los deflectores requerido, Table R-4.41 [4].

BAFFLE OR SUPPORT PLATE THICKNESS									
Dimensions in Inches (mm)									
Nominal Shell ID		Plate Thickness							
		Unsupported tube length between central baffles. End spaces between tubesheets and baffles are not a consideration.							
		12 (305) and Under	Over 12 (305) to 24 (610) Inclusive	Over 24 (610) to 36 (914) Inclusive	Over 36 (914) to 48 (1219) Inclusive	Over 48 (1219) to 60 (1524) Inclusive	Over 60 (1524)		
6-14	(152-356)	1/16 (1.6)	1/8 (3.2)	3/16 (4.8)	1/4 (6.4)	3/8 (9.5)	3/8 (9.5)	3/8 (9.5)	
15-28	(381-711)	1/8 (3.2)	3/16 (4.8)	1/4 (6.4)	3/8 (9.5)	3/8 (9.5)	1/2 (12.7)	1/2 (12.7)	
29-38	(737-965)	3/16 (4.8)	1/4 (6.4)	5/16 (7.5)	3/8 (9.5)	1/2 (12.7)	5/8 (15.9)	5/8 (15.9)	
39-60	(991-1524)	1/4 (6.4)	1/4 (6.4)	3/8 (9.5)	1/2 (12.7)	5/8 (15.9)	5/8 (15.9)	5/8 (15.9)	
61-100	(1549-2540)	1/4 (6.4)	3/8 (9.5)	1/2 (12.7)	5/8 (12.7)	3/4 (19.1)	3/4 (19.1)	3/4 (19.1)	

Tabla 4. Espesor de los deflectores requerido, Table CB-4.41 [4].

**Orientación de los deflectores:** los deflectores segmentados están orientados alternamente 180° entre ellos, lo que produce que el fluido circule de manera normal por el haz de tubos y paralelamente por la ventana del deflector. Todos los deflectores segmentados tienen un corte del deflector horizontal, salvo en casos de condensación (para que el condensado fluya fácilmente hacia la salida), para fluidos en ebullición o condensación o para fluidos con sólidos en suspensión en los que se utilizan cortes del deflector verticales.

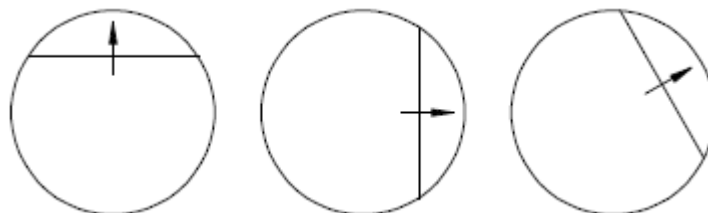
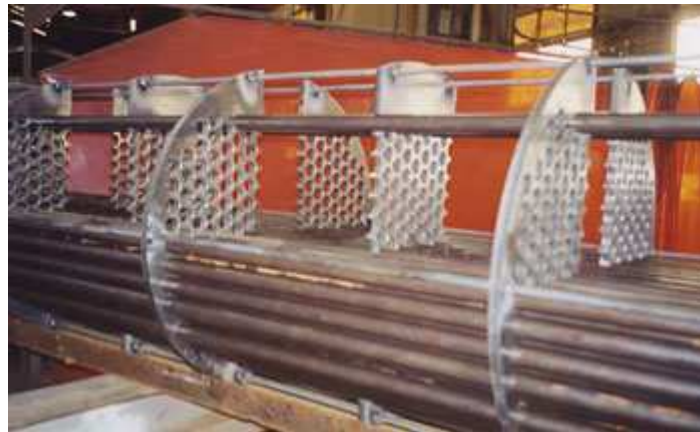


Figura 29. Diferentes cortes del deflector.



## DISEÑO BAJO NORMA TEMA DE INTERCAMBIADORES TUBO-CARCASA

Los deflectores segmentados se pueden encontrar de segmentado simple o segmentado múltiple. Los deflectores de segmentado múltiple se utilizan en casos con limitaciones de pérdida de carga, ya que el fluido circula prácticamente de forma paralela a los tubos, produciéndose una pérdida de carga mucho menor.



*Figura 30. Deflectores de segmentación doble.*



*Figura 31. Deflectores de segmentación triple.*

## DISEÑO BAJO NORMA TEMA DE INTERCAMBIADORES TUBO-CARCASA

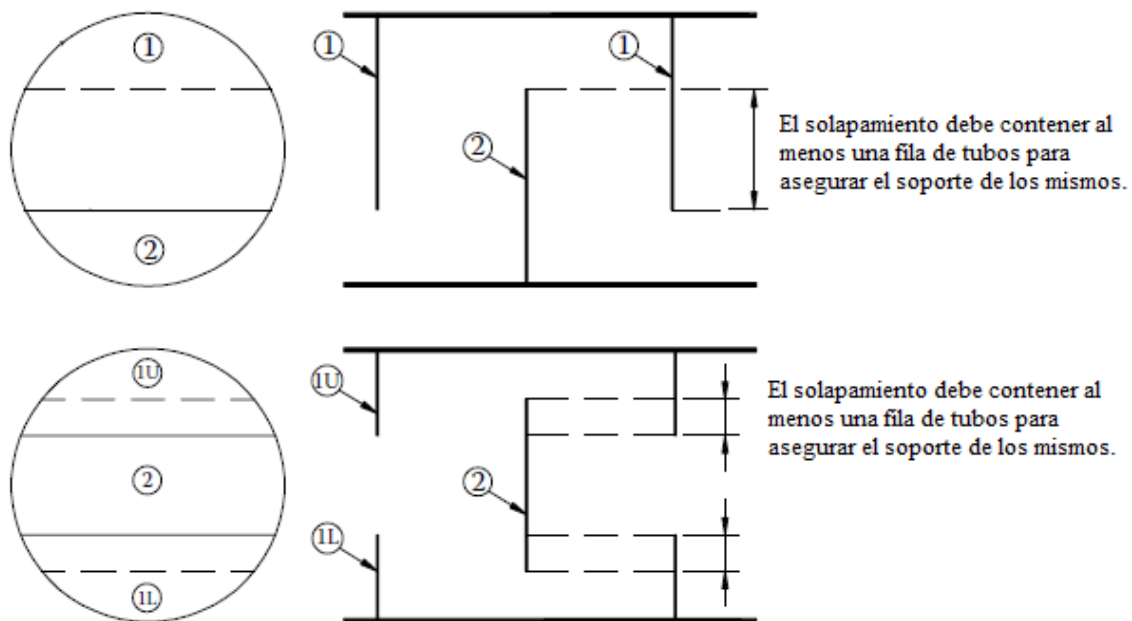


Figura 32. Requerimientos en la disposición de los deflectores de segmentación múltiple.

#### 4.2.3.1.2 Deflectores disco y anillo

Consisten en una sucesión de deflectores con forma de anillo y de disco alternos. Producen una pérdida de carga menor que los segmentados y elimina las filtraciones entre carcasa y haz de tubos. Se utilizan principalmente en intercambiadores de calor nucleares [6].

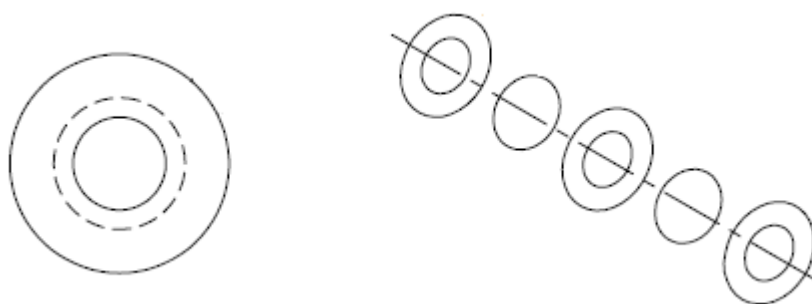


Figura 33. Deflectores de disco y anillo.

#### 4.2.3.1.3 Deflectores con orificios

En este tipo de deflectores, la holgura entre los tubos y los orificios del deflector es mucho mayor, y se utilizan estos mismos orificios como deflectores. No ayudan a soportar los tubos, debido al *fouling* se taponan fácilmente y no se pueden limpiar. Raramente se utilizan.

#### 4.2.3.1.4 Sin tubos en la ventana

Normalmente la zona de la ventana del deflector también contiene tubos. Dado que dichos tubos están soportados a una distancia el doble de la separación central de los deflectores y por lo tanto son más susceptibles de vibrar. En este caso, dichos tubos se eliminan por lo que todos los tubos del intercambiador pasan por los agujeros de los deflectores.

La pérdida de carga con estos deflectores es en torno a un tercio de la producida con los segmentados simples. Además, se reduce la tendencia al fouling. El principal problema es la disminución de superficie de intercambio de calor, lo que puede ser minimizado mediante aumentos de velocidad en la carcasa o carcasas con mayor diámetro [11].

#### 4.2.3.2 Deflectores longitudinales

Dividen la carcasa en dos o más secciones para permitir realizar más de un paso por carcasa. No se debe usar a menos que el deflector esté soldado a la carcasa ya que se producirían fugas, lo que resulta contraproducente. Cuando es necesario más de un paso por la carcasa, es más económico el uso de carcasas separadas, a menos que el diámetro de la carcasa sea lo suficientemente grande para que la soldadura del deflector a la carcasa sea fácil [8].

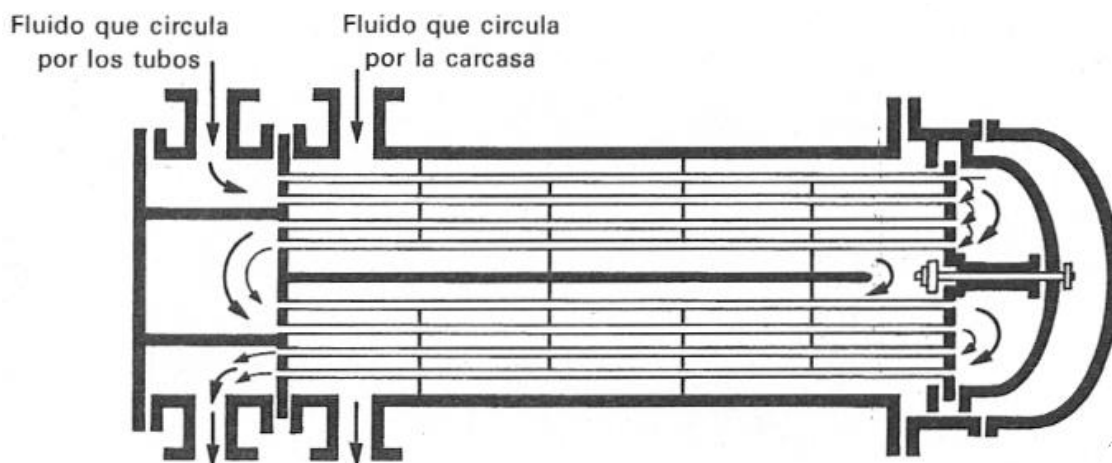


Figura 34. Intercambiador tubo-carcasa con deflector longitudinal.

#### 4.2.3.3 Otro tipo de deflectores

Existen diversos tipos de deflectores patentados que pretenden mejorar los problemas de vibración en los tubos y la pérdida de carga sin perjudicar la transferencia de calor. Algunos de ellos son NEST™ baffle, EGG-CRATE-GRID™, los baffles Grimmas o los baffles Holtec no segmentados.

## DISEÑO BAJO NORMA TEMA DE INTERCAMBIADORES TUBO-CARCASA

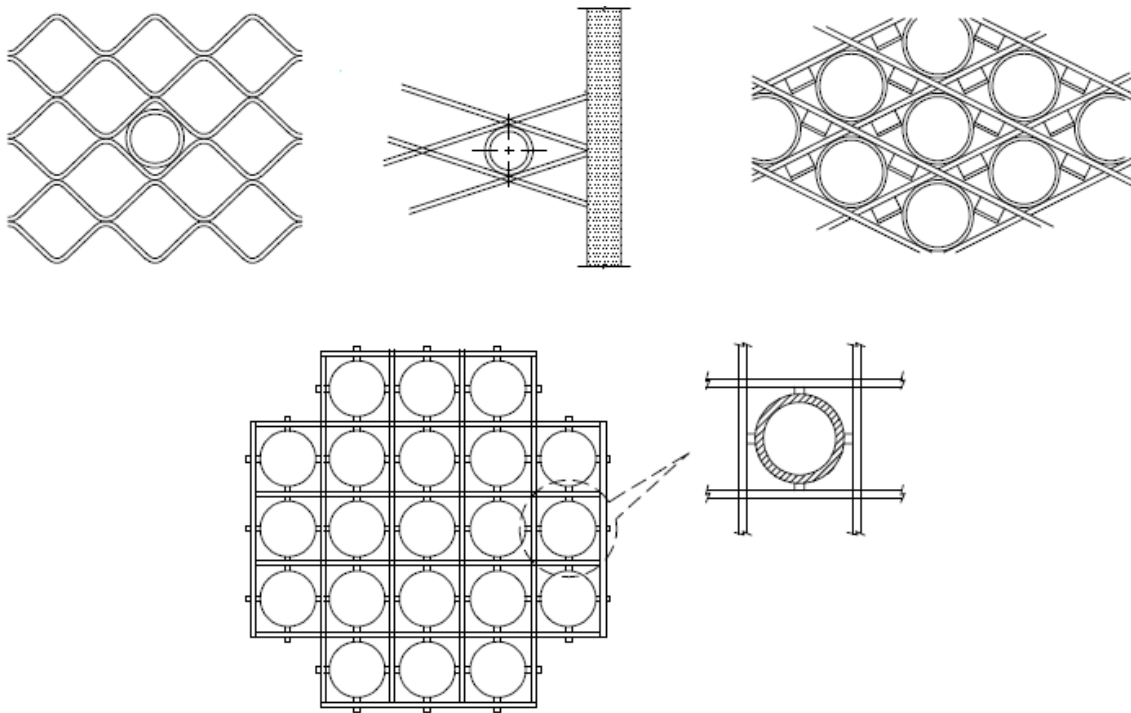


Figura 35. Ejemplos de algunos deflectores patentados.

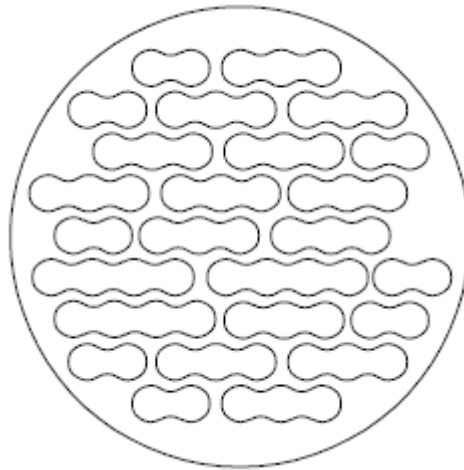


Figura 36. Deflector tipo Grimmas.

#### 4.2.4 Placa tubular o placa de tubos (*tubesheet*)

Es la principal separación entre los fluidos, en ella van incrustados los tubos, de modo que el fluido que circula por su exterior no entre en contacto con el del interior. La mayoría son circulares con agujeros taladrados según la disposición de los tubos deseada.





*Figura 37. Placa tubular.*

Debe además cumplir con los requerimientos mecánicos, soportar la corrosión por parte de ambos fluidos y ser químicamente compatible con el material de los tubos. Por lo general, están fabricadas de acero de bajo contenido en carbono con una capa de aleación anticorrosiva, pero también se fabrican de otros metales, como el titanio.

#### *4.2.4.1 Unión tubos-placa tubular*

El método más utilizado es la expansión, pero en los casos en los que las tensiones o las presiones pueden causar fugas se utiliza la soldadura. También se utiliza en casos en los que la contaminación entre los fluidos no es permisible.

#### *4.2.4.2 Doble placa tubular*

Cuando se desea eliminar completamente la posibilidad de contaminación entre ambos fluidos debido a las fugas, se opta por la utilización de una doble placa de tubos.



*Figura 38. Intercambiador con doble placa tubular.*



#### 4.2.4.2.1 Diseño convencional

En este tipo de diseño, las dos placas tubulares se instalan con una pequeña separación entre ellas para detectar cualquier fuga rápidamente. En aplicaciones más peligrosas se puede utilizar una placa tubular triple, sellos gaseosos e incluso un sistema de recirculación de fugas.

#### 4.2.4.2.2 Diseño integral

Es un diseño patentado consistente en una sola placa similar a una placa tubular simple pero con unas muescas en el interior de los agujeros que interconectan los tubos con el fin de reducir las fugas. Minimiza los problemas de dilatación diferencial pero no es tan efectivo como la doble placa tubular convencional evitando la mezcla de los fluidos, además de ser caro.

#### 4.2.4.2.3 Inconvenientes de una doble placa tubular

Se debe evitar la utilización de una doble placa tubular si no es necesario, ya que presenta diversos inconvenientes [12].

- Superficie de los tubos no aprovechada
- Mayor coste de fabricación
- Todos los procesos de puesta en marcha y parada son más complicados
- Aparecen los problemas de dilatación radial diferencial y dilatación longitudinal diferencial entre las dos placas tubulares

#### 4.2.5 Haz de tubos (*tube bundle*)

Es el conjunto de tubos, deflectores, placas tubulares, *tie-rods* y *spacers* y deflectores longitudinales si los hubiera.



Figura 39. Haz de tubos.

#### 4.2.5.1 Spacers y tie-rods y dispositivos de sellado

Los *spacers* y *tie-rods* son necesarios para mantener la separación entre los deflectores. Los *tie-rods* son barras que se encuentran incrustadas en la placa tubular y llegan hasta el último deflector. Entre los deflectores se encuentran los *spacers* que van solapados a las barras para mantener la distancia entre deflectores constante. Aportan también la función de sellado impidiendo las fugas entre la carcasa y el haz de tubos. El número necesario de ambos está especificado por TEMA.

#### 4.2.5.2 Límite de los tubos externo

Conocido como *outer tube limit* (OTL) es el diámetro del círculo que circunscribe todos los tubos del haz de tubos.

#### 4.2.6 Carcasa

Las carcasas son fabricadas en un amplio rango de medidas estándar, materiales y espesores. Las más pequeñas normalmente se fabrican a partir de tubos de tamaños estandarizados, mientras que las que son más grandes se fabrican mediante el enrollado



## DISEÑO BAJO NORMA TEMA DE INTERCAMBIADORES TUBO-CARCASA

de placas. El coste de la carcasa es mucho mayor que el coste de los tubos, por lo que en el proceso de diseño se trata de que sólo sea necesaria una carcasa. Normalmente los intercambiadores más baratos se forman mediante carcasas de menor diámetro y mayor longitud.

Los diámetros de carcasa normalizados están especificados por TEMA.

MINIMUM SHELL THICKNESS Dimensions in Inches (mm)					
Nominal Shell Diameter		Minimum Thickness			
		Carbon Steel		Alloy *	
		Pipe	Plate		
6	(152)	SCH. 40	-	1/8	(3.2)
8-12	(203-305)	SCH. 30	-	1/8	(3.2)
13-29	(330-737)	SCH. STD	3/8 (9.5)	3/16	(4.8)
30-39	(762-991)	-	7/16 (11.1)	1/4	(6.4)
40-60	(1016-1524)	-	1/2 (12.7)	5/16	(7.9)
61-80	(1549-2032)	-	1/2 (12.7)	5/16	(7.9)
81-100	(2057-2540)	-	1/2 (12.7)	3/8	(9.5)

Tabla 5. Diámetros de carcasa normalizados, Table R-3.13 [4].

MINIMUM SHELL THICKNESS Dimensions in Inches (mm)					
Nominal Shell Diameter		Minimum Thickness			
		Carbon Steel		Alloy *	
		Pipe	Plate		
6	(152)	SCH. 40	-	1/8	(3.2)
8-12	(203-205)	SCH. 30	-	1/8	(3.2)
13-23	(330-584)	SCH. 20	5/16 (7.9)	1/8	(3.2)
24-29	(610-737)	-	5/16 (7.9)	3/16	(4.8)
30-39	(762-991)	-	3/8 (9.5)	1/4	(6.4)
40-60	(1016-1524)	-	7/16 (11.1)	1/4	(6.4)
61-80	(1549-2032)	-	1/2 (12.7)	5/16	(7.9)
81-100	(2057-2540)	-	1/2 (12.7)	3/8	(9.5)

Tabla 6. Diámetros de carcasa normalizados, Table CB-3.13 [4].

#### 4.2.6.1 Junta de expansión

Dado que los fluidos del lado de la carcasa y de los tubos están a distinta temperatura se producen diferencias en la dilatación térmica. Si la diferencia de temperaturas es grande, se producen tensiones en la carcasa y el haz de tubos. En los intercambiadores de cabezal fijo, este problema es más significativo, por lo que es necesario incluir una junta de expansión en la carcasa para solucionar el problema. En los intercambiadores con tubos en U y de cabezal flotante este problema se soluciona gracias al diseño.



Figura 40. Intercambiador con junta de expansión.

#### 4.2.6.2 Boquillas y protección contra el impacto

Las boquillas se utilizan para realizar la entrada y la salida del fluido del intercambiador. Son tubos de sección constante soldados a la carcasa. La entrada del fluido en la carcasa puede dañar los tubos debido a la erosión causada por la alta velocidad de entrada o por pequeñas partículas en suspensión que pueda contener el fluido, también en el caso de mezclas líquido-vapor la erosión es intensa. La necesidad o no de incluir una placa de impacto está especificada en TEMA en función de la energía cinética de entrada o la abrasividad del fluido.

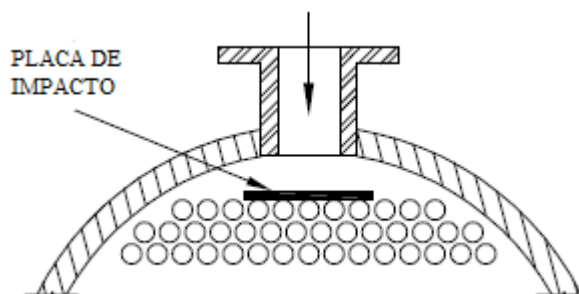


Figura 41. Placa de impacto.

#### 4.2.6.3 Ventilación y drenajes

Es necesario realizar algunas aberturas en la carcasa para introducir los drenajes y la ventilación del intercambiador, así como otros instrumentos de medida como termopares o medidores de presión.

#### 4.2.6.4 Tiras de sellado (sealing strips)

Son dispositivos de sellado que se colocan a lo largo de la carcasa, para impedir que el fluido circule entre el haz de tubos y la carcasa, evitando los tubos.



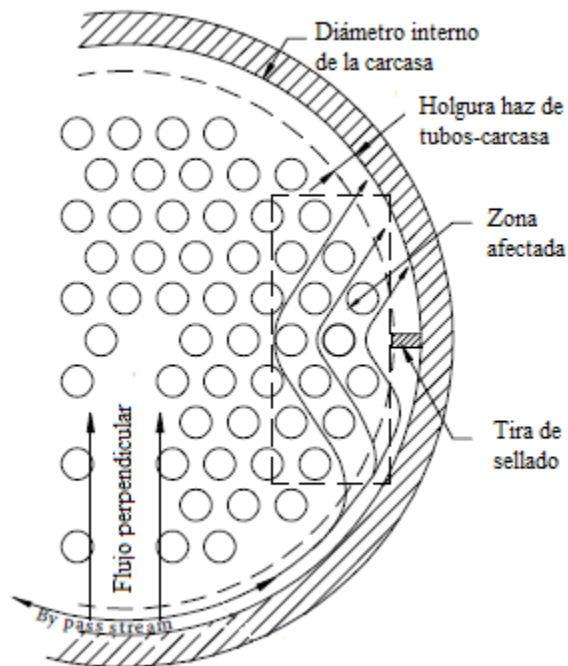


Figura 42. Disposición de las tiras de sellado en un intercambiador.

Existen distintos tipos de *sealing strips*:

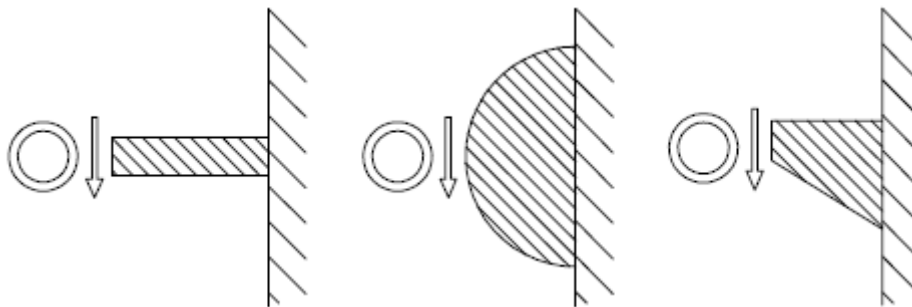


Figura 43. Tipos de tiras de sellado.

#### 4.2.7 Pasos

##### 4.2.7.1 Pasos por los tubos

El paso más simple es que el fluido entre por un extremo y salga por el otro, sería una disposición de un sólo paso. Para mejorar el coeficiente de transferencia y hacer el flujo lo más parecido a contracorriente posible, se aumenta el número de pasos. Normalmente se diseñan los intercambiadores con el mismo número de tubos en cada paso, de modo que la velocidad por los tubos sea la misma en todos los pasos.

DISEÑO BAJO NORMA TEMA DE INTERCAMBIADORES TUBO-CARCASA

---

El número de pasos generalmente oscila entre uno y ocho. El máximo número de pasos está limitado en general por limitaciones de los fabricantes y en el montaje. En disposiciones de paso múltiple se suelen utilizar un número par de pasos, ya que los números de pasos impares pueden llevar a problemas térmicos y mecánicos en su fabricación y su funcionamiento. Larowski [13] sugiere las siguientes directrices:

- Si el fluido que va por los tubos es bifásico, ya sea condensando o en ebullición, es mejor que fluya por un único tubo o en un tubo en U.
- Si el coeficiente de transferencia del lado de la carcasa es significativamente menor que el de los tubos, no es recomendable aumentar el coeficiente de transferencia de los tubos a costa de incrementar la pérdida de carga ya que el aumento del coeficiente de transferencia global no será significativo.

## DISEÑO BAJO NORMA TEMA DE INTERCAMBIADORES TUBO-CARCASA

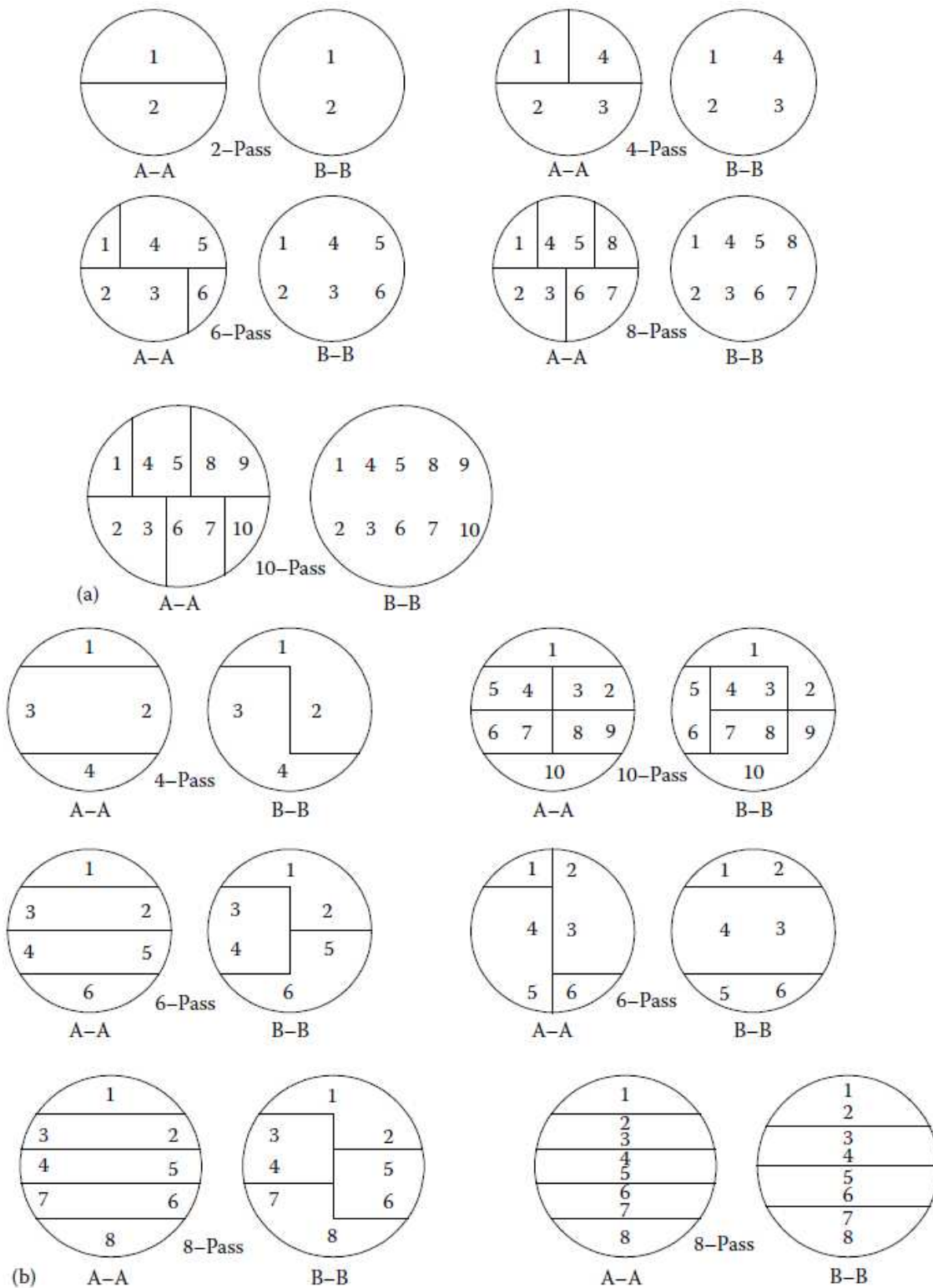


Figura 44. Disposiciones típicas de los pasos por los tubos. (a) Tubos en U y (b) tubos rectos. A-A: vista frontal y B-B: vista trasera.



#### 4.2.7.2 Pasos por la carcasa

Para intercambiadores que requieren una alta eficiencia, es necesario utilizar más de un paso por carcasa. Se puede utilizar deflectores longitudinales, pero reducen el área de paso por la carcasa en comparación con un solo paso. La otra opción es conectar diversas carcasas en serie.

#### 4.2.8 Clasificación de intercambiadores tubo-carcasa en función del cabezal

Existen tres tipos de intercambiadores tubo-carcasa: intercambiadores de cabezal fijo, intercambiadores de cabezal flotante e intercambiadores con tubos en forma de U. La elección de uno u otro depende de diversos factores [7], como son la dilatación térmica diferencial, medios de controlar el fluido por los tubos y la carcasa y facilidades en el mantenimiento así como el coste. Los intercambiadores de cabezal fijo son los más baratos normalmente excepto si es necesaria una junta de expansión, en cuyo caso un intercambiador de tubos en U puede resultar más barato.

##### 4.2.8.1 Intercambiadores de cabezal fijo

Es el tipo de intercambiadores más utilizado. Se fabrican con las placas tubulares soldadas a la carcasa a ambos lados, de modo que todos los tubos son rectos y tienen a cada extremo una placa tubular. Se minimiza el número de juntas y por tanto es necesario menos mantenimiento.

En este tipo de intercambiadores se utilizan los cabezales anteriores TEMA A, B o N y los cabezales posteriores L, M o N.

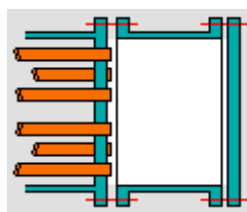


Figura 45. Cabezal fijo tipo L.

Se pueden utilizar en las siguientes situaciones [14]:

- Se desea minimizar el número de juntas
- Las temperaturas de trabajo no presentan un problema de tensiones térmicas
- El fluido que circula por la carcasa es limpio y no es necesario desmontar el haz de tubos
- Se desea un alto grado de protección ante contaminación de las corrientes

- Se puede utilizar doble placa tubular
- Se puede realizar limpieza mecánica

Son intercambiadores de un número impar de pasos por tubo ya que el fluido que circula por los tubos entra y sale del intercambiador por lados opuestos.

Se debe realizar un análisis térmico considerando todas las fases de operación para evaluar si las tensiones térmicas son un problema y cómo solucionarlo si así es.

#### 4.2.8.2 Intercambiadores de cabezal flotante

Consisten en una placa tubular fija y otra flotante que se encuentra libre para permitir la dilatación térmica del haz de tubos. Se utilizan cabezales anteriores TEMA A, B o C.

Existen cuatro tipos de cabezales flotantes posteriores.

*Flotante externo:* (cabezal P) se utiliza el faldón exterior de la placa de tubos como parte del cabezal flotante. Permite el sellado y a su vez que el cabezal flotante se mueva. El haz de tubos es extraíble por lo que el mantenimiento es muy fácil. Con este tipo de cabezal, las fugas se producen sólo hacia el exterior, nunca hacia el otro fluido, de modo que no existe contaminación. Suele ser necesario el uso de tiras de sellado, ya que existe una holgura entre haz de tubos y carcasa de en torno a 4cm. Se recomienda este tipo de cabezales para baja presión, baja temperatura y fluidos no peligrosos.

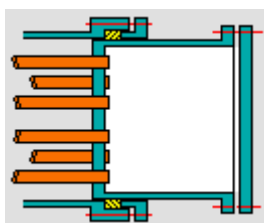


Figura 46. Cabezal flotante tipo P.

*Flotante sellado externamente:* (cabezal W) se utiliza un anillo rodeando a la placa de tubos, para sellar los dos fluidos permitiendo que la placa de tubos se mueva hacia atrás y hacia adelante. El número de pasos por los tubos está limitado a uno o dos. El haz de tubos es extraíble y es el cabezal flotante de menor coste. El anillo está provisto de pequeños orificios para que las posibles fugas que se produzcan sean hacia el exterior. Se recomienda este tipo de cabezales para baja presión, baja temperatura y fluidos no peligrosos.

## DISEÑO BAJO NORMA TEMA DE INTERCAMBIADORES TUBO-CARCASA

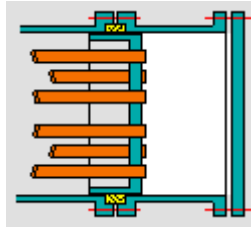


Figura 47. Cabezal flotante tipo W.

*Tracción continua:* (cabezal T) consiste en una cubierta del cabezal atornillada a la placa de tubos. El haz de tubos se puede extraer sin desmontar las juntas del cabezal flotante. Es necesario retirar muchos tubos del diámetro exterior debido a los pernos. Esto implica un menor número de tubos para un mismo diámetro de carcasa, y una holgura entre haz de tubos y carcasa superior. Para solventar la reducción de eficiencia térmica es necesario el uso de tiras de sellado y un aumento del diámetro de la carcasa. La aplicación ideal para este tipo de cabezal son los *Kettle reboiler* (carcasa TEMA K, explicada más adelante).

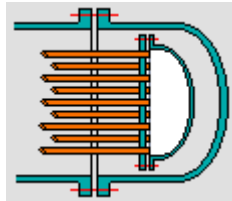


Figura 48. Cabezal flotante tipo T.

*Anillos divididos:* (cabezal S) a diferencia del cabezal de tracción continua, en este caso, la cubierta del cabezal está atornillada a un anillo. La carcasa situada en el cabezal flotante tiene un diámetro mayor que el resto de la carcasa. Por lo que la holgura en la carcasa es pequeña, y normalmente no se necesitan tiras de sellado. El haz de tubos no es extraíble. Es necesario desmontar ambos extremos del intercambiador para limpieza y mantenimiento. Se recomienda este tipo de cabezal para alta presión y fluidos no peligrosos.

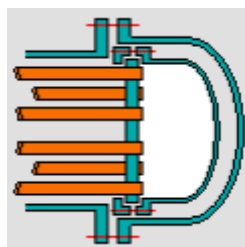


Figura 49. Cabezal flotante tipo S.



#### 4.2.8.3 Intercambiadores con tubos en forma de U

En este tipo de intercambiadores el haz de tubos es libre de expandirse y se puede extraer.

Se utilizan con los cabezales anteriores A, B, C, N o D.

Se pueden utilizar en los siguientes casos [14]:

- El fluido que circula por los tubos es limpio
- Alta presión en uno de los fluidos
- Las temperaturas de trabajo requieren dilatación térmica para que no se produzcan tensiones excesivas
- Intercambiadores que trabajen con  $H_2$  a alta presión, realizando un intercambiador soldado sin posibilidad de extraer el haz de tubos
- Para permitir que la entrada del fluido en la carcasa no se produzca directamente en el haz de tubos
- Se quiere utilizar doble placa tubular
- Se desea un alto grado de protección ante contaminación de las corrientes

Presentan algunos inconvenientes:

- La limpieza mecánica de los tubos en su interior es difícil
- La vibración debido al flujo de la carcasa puede ser un problema en los tubos más externos
- Tienen menos área de contacto en comparación con los tubos rectos
- Los tubos internos son difíciles de reemplazar, teniendo muchas veces que extraer también algunos tubos exteriores.
- Presentan una mayor erosión en su interior cuando las velocidades por los tubos son elevadas.
- Aumenta la pérdida de carga debido al cambio de dirección en la curva.

#### 4.2.9 Tipos de carcasa

Existen siete tipos de carcasa estándar según TEMA [4] en función del flujo en su interior:

##### 4.2.9.1 Carcasa TEMA E

El tipo E es el más utilizado debido a su coste, simplicidad y facilidad de fabricación. Tiene un paso por la carcasa, con la entrada y salida del fluido a la carcasa por extremos opuestos. Es la más común en aplicaciones con fluidos en una sola fase. Múltiples pasos por los tubos reducen la eficiencia del intercambiador o el factor de corrección F con

## DISEÑO BAJO NORMA TEMA DE INTERCAMBIADORES TUBO-CARCASA

respecto a una configuración de un solo paso. Si  $F$  es demasiado bajo, se pueden utilizar dos carcasa E en serie para aumentar la eficiencia.

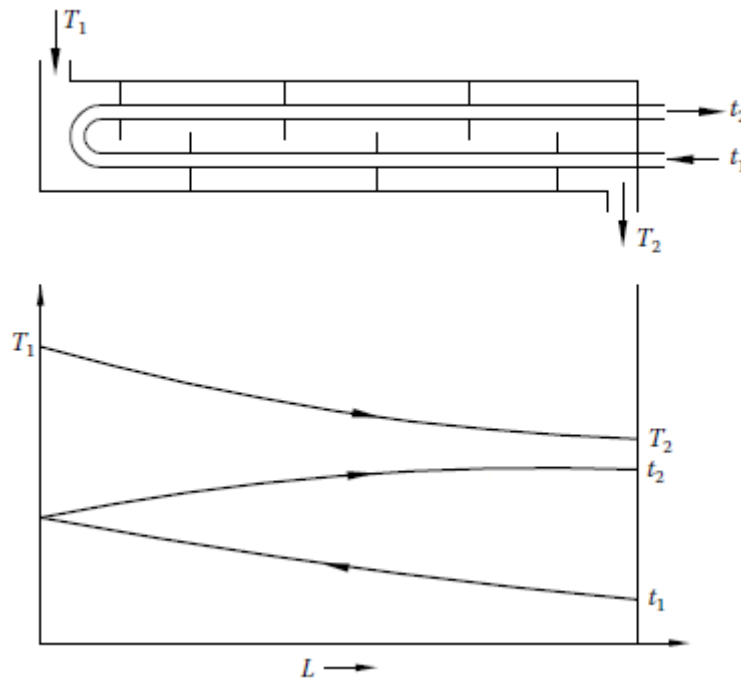


Figura 50. Carcasa tipo TEMA E.

#### 4.2.9.2 Carcasa TEMA F

Tiene dos pasos por carcasa y se suele utilizar con dos pasos por tubos también, de modo que la disposición del flujo es contracorriente, resultando en un factor  $F$  de 1. Las boquillas de entrada y salida se encuentran en el mismo extremo de la carcasa. Se transfiere una mayor cantidad de calor que en una carcasa tipo E a costa de una mayor pérdida de carga, en torno a ocho veces mayor, debido a que la velocidad por la carcasa será el doble. A pesar de esto, no se utiliza a menudo debido a diversos problemas asociados al deflector longitudinal.

- Se produce transferencia de calor por conducción a través del deflector longitudinal debido al gradiente de temperatura entre ambos pasos por la carcasa
- Si el deflector longitudinal no está completamente soldado a la carcasa o si el sellado no es efectivo, se producirán fugas del lado de alta presión al de baja

Estos factores reducen la eficiencia del intercambiador más de lo que se consigue gracias al flujo contracorriente. Además si el deflector longitudinal está soldado no es posible extraer el haz de tubos para su inspección y limpieza.

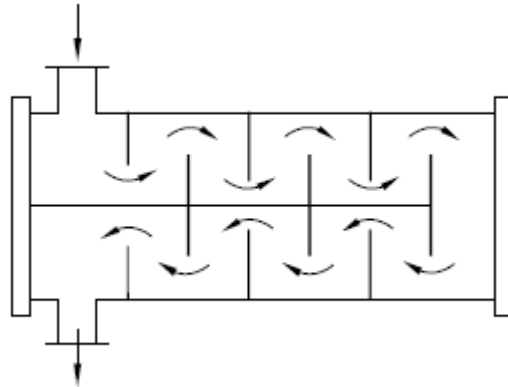


Figura 51. Carcasa tipo TEMA F.

#### 4.2.9.3 Carcasa TEMA G

Este intercambiador tiene una boquilla central de entrada y una boquilla central de salida con un deflector longitudinal. El flujo entra por la boquilla central y se divide en dos corrientes, por ello son conocidos como intercambiadores de flujo dividido. Una de sus principales características es su capacidad de producir factores de corrección de temperatura similares a los de las carcasas F, con una menor pérdida de carga en la carcasa [15].

En la siguiente figura, se puede apreciar la variación de la temperatura de los fluidos a lo largo de la carcasa según las diferentes disposiciones.

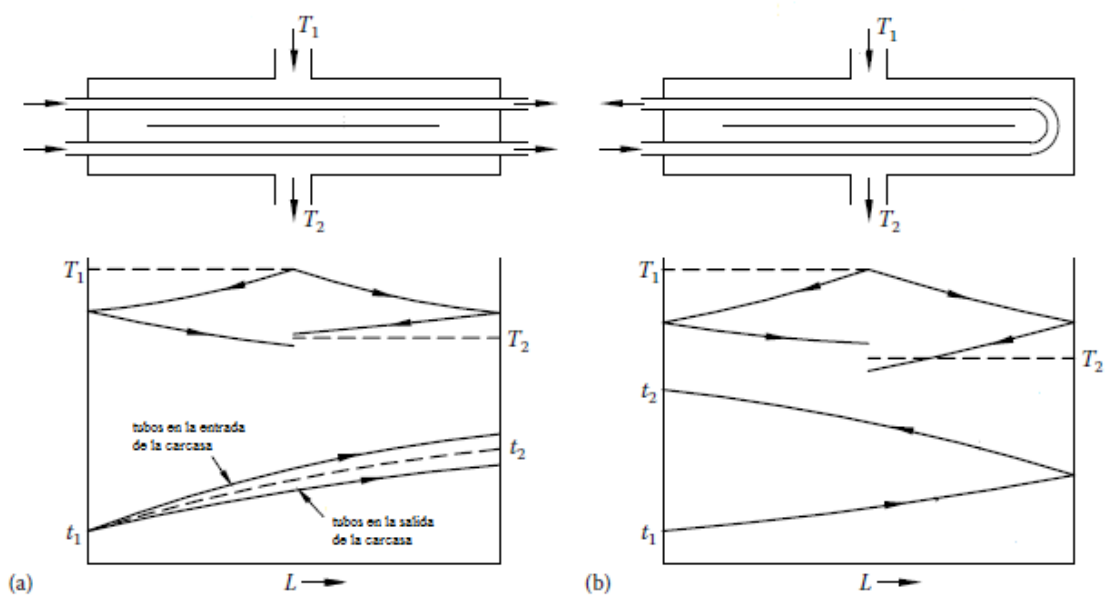


Figura 52. Carcasa tipo TEMA G.

#### 4.2.9.4 Carcasa TEMA H

Es similar a la carcasa tipo G, pero con dos boquillas de entrada y dos boquillas de salida con dos deflectores longitudinales, resultando en un intercambiador de doble flujo dividido. Se utiliza cuando la pérdida de carga admisible es muy baja. En comparación con la carcasa tipo E tiene una pérdida de carga de  $1/8$  debido a que la velocidad por la carcasa es la mitad.

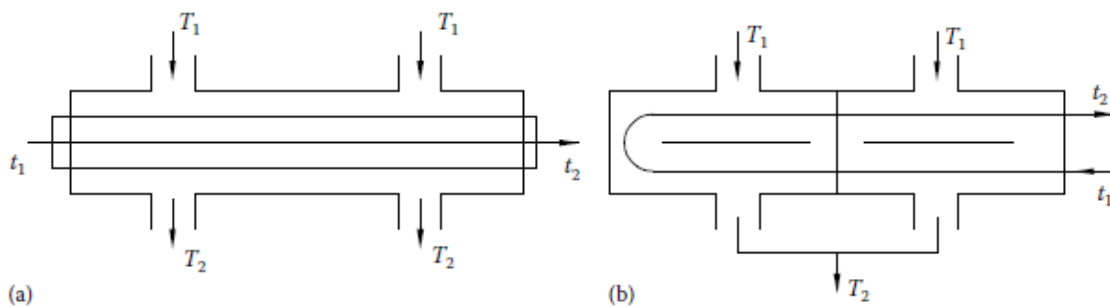


Figura 53. Carcasa tipo TEMA H.

Los intercambiadores tipo E y H se utilizan sobre todo en aplicaciones con cambio de fase en las que las fugas y el flujo contracorriente son menos importante que una buena distribución del flujo.

#### 4.2.9.5 Carcasa TEMA J

Este tipo de carcasa tiene una boquilla de entrada y dos de salida, o una de salida y dos de entrada. La velocidad por la carcasa es la mitad que en una carcasa E de modo que la pérdida de carga será en torno a  $1/8$ . Se utiliza en aplicaciones con baja pérdida de carga admisible.

En la siguiente figura, se puede apreciar la variación de la temperatura de los fluidos a lo largo de la carcasa según las diferentes disposiciones.

## DISEÑO BAJO NORMA TEMA DE INTERCAMBIADORES TUBO-CARCASA

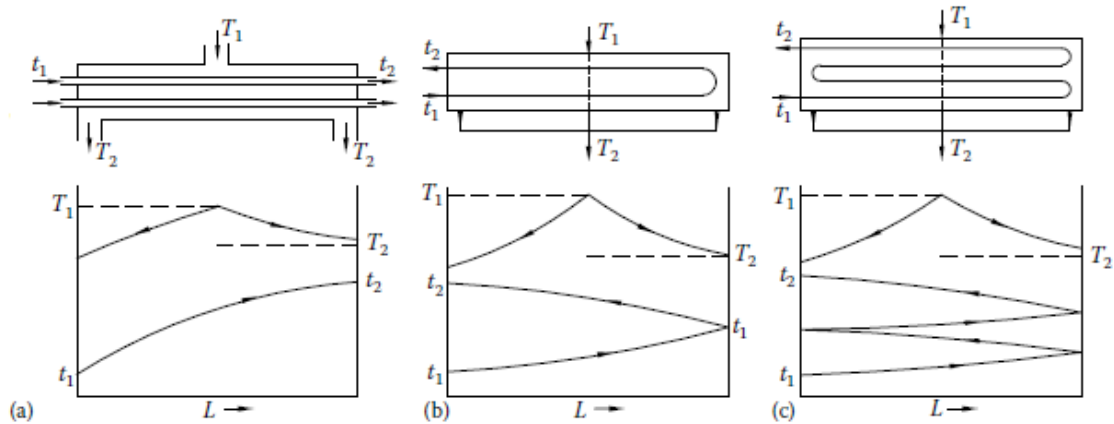


Figura 54. Carcasa tipo TEMA J.

## 4.2.9.6 Carcasa TEMA K

También conocido como *Kettle* Reboiler. Se utiliza para fluidos en vaporización, tanto en sobrecalentamiento como en enfriamiento en aplicaciones de refrigeración. Consiste normalmente en un haz de tubos en U horizontal en una carcasa mayor de lo normal, el diámetro del haz de tubos es en torno a un 50%-70% del diámetro de la carcasa.

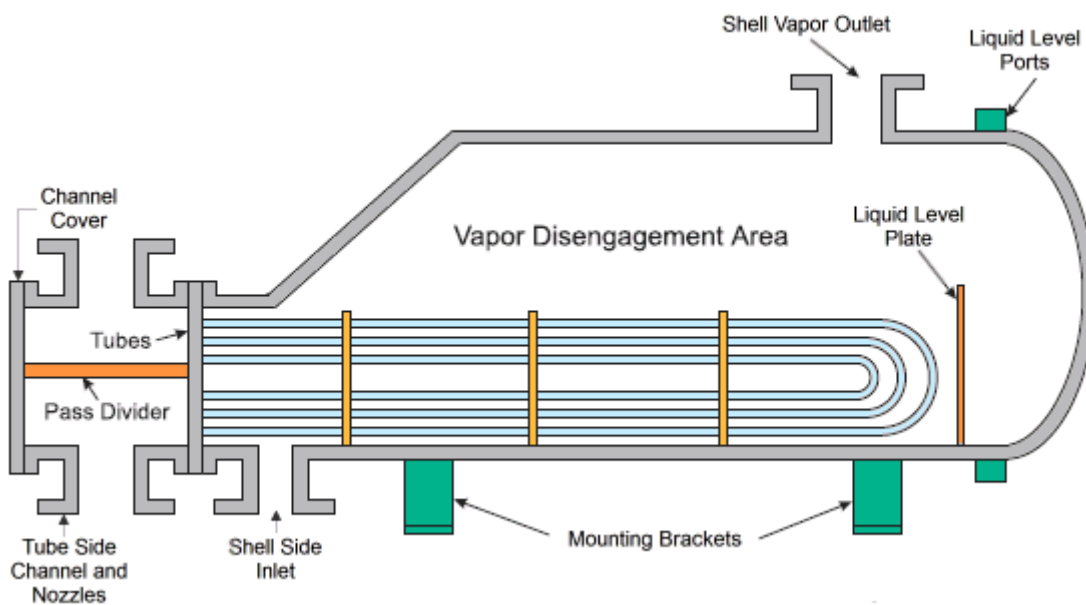


Figura 55. Carcasa tipo TEMA K.

## 4.2.9.7 Carcasa TEMA X

En este tipo de carcasa no se utilizan deflectores transversales pero se utilizan placas para eliminar la vibración producida por el flujo en la carcasa. Las boquillas se



## DISEÑO BAJO NORMA TEMA DE INTERCAMBIADORES TUBO-CARCASA

encuentran en el centro como en la carcasa tipo G. El flujo se divide en multitud de corrientes después de entrar por la boquilla. Pueden existir problemas en la distribución del flujo que se pueden solucionar haciendo la entrada del fluido a la carcasa de manera uniforme. Es la carcasa con menor pérdida de carga por lo que se utiliza para calentamiento y enfriamiento de gases y para aplicaciones de condensación en vacío.

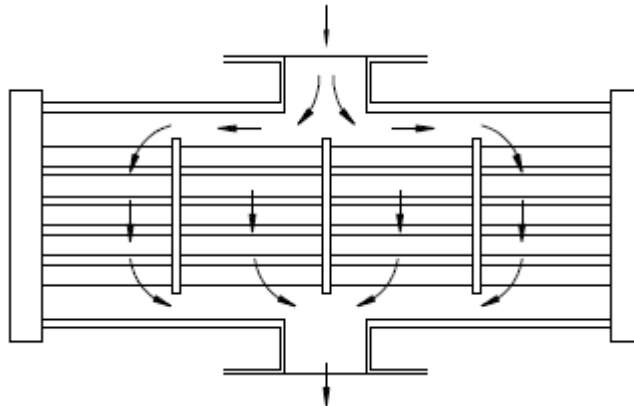


Figura 56. Carcasa tipo TEMA X.

### 4.3 DILATACIÓN TÉRMICA DIFERENCIAL

Al existir una alta diferencia de temperatura entre los metales de la carcasa y el haz de tubos, se produce también una diferencia en la dilatación y la contracción. Esto ha de ser tenido en cuenta, y es especialmente relevante en intercambiadores de cabezales fijos.

*Tubos en U:* este diseño permite que cada tubo se dilate y se contraiga independientemente.

*Cabezales fijos:* en los intercambiadores de cabezales fijos, cuando la diferencia de temperatura entre los metales de la carcasa y el haz de tubos es grande (unos 50°C), el espesor de la placa tubular y las tensiones en los extremos de los tubos se vuelven demasiado grandes. Para solucionarlo se incorpora una junta de expansión en la carcasa [16].

*Cabezales flotantes:* en estos intercambiadores una de las placas tubulares es flotante y se mueve libremente para compensar la dilatación o contracción térmica de los tubos.

### 4.4 COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR Y PÉRDIDA DE CARGA

#### 4.4.1 Coeficiente de transferencia de calor

El coeficiente de transferencia de calor en los tubos es función del número de Reynolds, el número de Prandtl y el diámetro del tubo. Para flujo turbulento, el coeficiente de



transferencia en los tubos varía con la potencia 0.8 de la velocidad del fluido por su interior. La viscosidad también tiene un papel importante en el coeficiente de transferencia de calor.

El coeficiente de transferencia de calor en la carcasa depende de parámetros como la velocidad del fluido en la carcasa, el diámetro de la carcasa, el corte de los deflectores, la separación entre deflectores, la holgura entre los tubos y los deflectores, diversas fugas que permiten circular al fluido por corrientes distintas a la deseada, el número de pasos por la carcasa o el tipo de carcasa.

#### 4.4.2 Pérdida de carga

La pérdida de carga depende de numerosas variables de diseño y de las propiedades de los fluidos.

En la corriente que circula por los tubos influyen el diámetro del tubo, la longitud del tubo, la forma de los tubos, el número de pasos por los tubos, el número de carcasas en serie o paralelo y el tamaño de las boquillas. En flujo turbulento, la pérdida de carga en los tubos es proporcional al cuadrado de la velocidad. Por lo que existe un óptimo en la velocidad de los tubos antes de que aumentarla resulte contraproducente. La velocidad mínima recomendable es de 1 m/s, mientras que la máxima es en torno a 2.5-3 m/s.

En la corriente que circula por la carcasa, la pérdida de carga depende de las variables de diseño como son el diámetro de los tubos, la distancia entre tubos (*tube pitch*), la disposición de los tubos (*layout*), el diámetro de la carcasa, el tipo de deflectores, el corte de los deflectores, la separación entre los mismos, la cantidad y el tamaño de las boquillas y el tipo de carcasa.



## 5. DISEÑO



A la hora de diseñar un intercambiador, es necesario calcular los coeficientes convectivos para ambos lados del intercambiador, tanto los tubos como la carcasa, así como las pérdidas de carga en los mismos.

Para ello, existen distintos métodos, pero el que se utilizará en este trabajo será el denominado Bell-Delaware.

## 5.1 TERMODINÁMICA

### 5.1.1 Balance de energía

Se debe cumplir la primera ley de la termodinámica en el diseño de cualquier intercambiador, que se rige por la ecuación:

$$m_h c_{p,h} (t_{h,i} - t_{h,o}) = m_c c_{p,c} (t_{c,o} - t_{c,i}) \quad (4.1.1)$$

Es decir, que la potencia térmica de transferencia de calor es la misma para ambos fluidos.

$$Q_s = Q_t = C_{p,t} m_t \Delta T_t \quad (4.1.2)$$

### 5.1.2 Eficiencia térmica

Existen cuatro métodos de diseño para calcular la eficiencia térmica de los intercambiadores de calor [17].

#### 5.1.2.1 $\varepsilon$ -NTU

En este método, el calor transferido del fluido caliente al frío se expresa como

$$q = \varepsilon C_{\min} (t_{h,i} - t_{c,i}) \quad (4.1.3)$$

donde  $\varepsilon$  es la eficiencia del intercambiador. Es adimensional y suele depender de NTU,  $C^*$  y la disposición de los flujos.

$$\varepsilon = \Phi(NTU, C^*, \text{flow arrangement})$$

$C^*$  es la relación de las capacidades caloríficas, la menor frente a la mayor, de modo que siempre es menor que 1.

$$C^* = \frac{C_{\min}}{C_{\max}} = \frac{(mc_p)_{\min}}{(mc_p)_{\max}} \quad (4.1.4)$$



NTU (*Number of Transfer Units*), se define como la relación entre la conductividad térmica global y la menor capacidad calorífica.

$$NTU = \frac{UA}{C_{\min}} \quad (4.1.5)$$

$\epsilon$  se define como la relación entre la transferencia de calor real y la máxima posible según la segunda ley de la termodinámica:

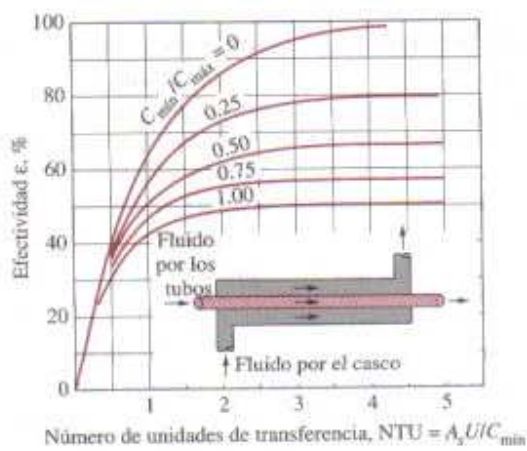
$$\epsilon = \frac{q}{q_{\max}} \quad (4.1.6)$$

Si  $C^*=1$ ,  $\epsilon_h = \epsilon_c$

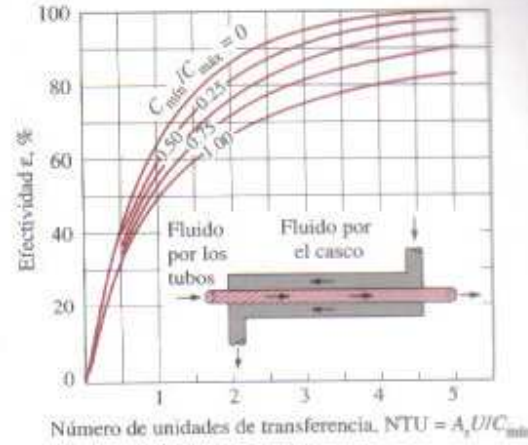
$$\epsilon = \frac{C_h(t_{h,i} - t_{h,o})}{C_{\min}(t_{h,i} - t_{c,i})} = \frac{C_c(t_{c,o} - t_{c,i})}{C_{\min}(t_{h,i} - t_{c,i})} \quad (4.1.7)$$

Si NTU es bajo, la eficiencia del intercambiador ( $\epsilon$ ) es baja en general. Según aumenta el valor de NTU, aumenta  $\epsilon$  y se aproxima al valor asintótico. En el caso de alcanzar un máximo,  $\epsilon$  decrece con el aumento de NTU.

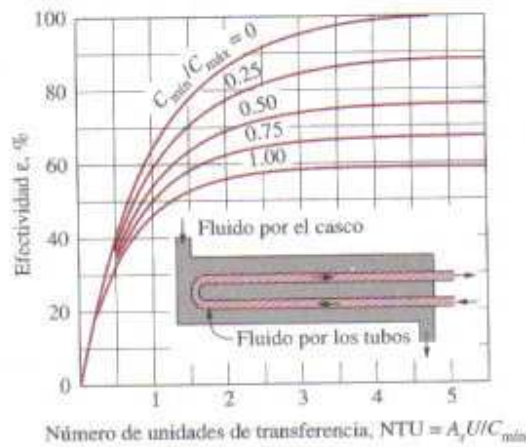
## DISEÑO BAJO NORMA TEMA DE INTERCAMBIADORES TUBO-CARCASA



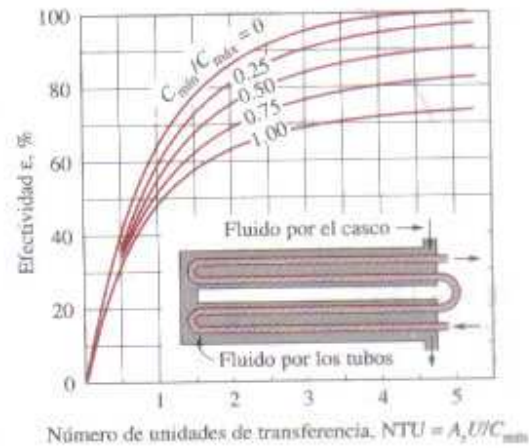
a) Flujo paralelo



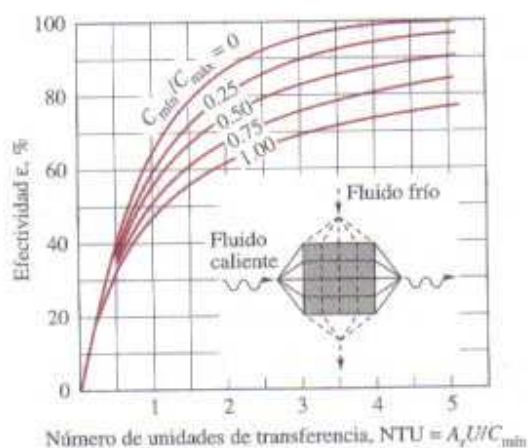
b) Contraflujo



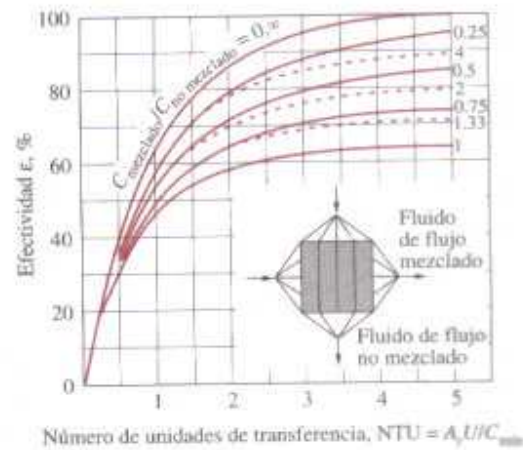
c) Un paso por el casco y 2, 4, 6, ... pasos por los tubos



d) Dos pasos por el casco y 4, 8, 12, ... pasos por los tubos



e) Flujo cruzado con los dos fluidos de flujo no mezclado



f) Flujo cruzado con uno de los fluidos de flujo mezclado y el otro no mezclado

Figura 57. Gráficas para la obtención de la efectividad en el método  $\varepsilon$ -NTU.



### 5.1.2.2 $P\text{-}NTU_t$

Es una variante del método  $\epsilon\text{-}NTU$ , ideada para intercambiadores tubo-carcasa. En este caso se utiliza la eficiencia de temperaturas del fluido elegido,  $P$ , en función de  $NTU$  y la relación de capacidades caloríficas de ese fluido frente al otro,  $R$ . Se utiliza el fluido que circula por los tubos, tanto si es el caliente como el frío. La transferencia de calor del fluido caliente al frío se define como

$$q = PC_t(T_1 - t_1) \quad (4.1.8)$$

Eficiencia térmica,  $P$ : para un intercambiador tubo-carcasa, la eficiencia de temperaturas del fluido que circula por los tubos,  $P$ , se conoce como eficiencia térmica. Se define como la relación entre la variación de temperatura del fluido de los tubos respecto a la temperatura de entrada de ambos fluidos.

$$P = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1} \quad (4.1.9)$$

donde

$t_1$  y  $t_2$  son las temperaturas de entrada y salida de los tubos, respectivamente  
 $T_1$  y  $T_2$  son las temperaturas de entrada y salida de la carcasa, respectivamente

Se puede deducir que

$$P = \frac{C_{\min}}{C_t} \epsilon \quad (4.1.10)$$

Relación de capacidades caloríficas,  $R$ : para un intercambiador tubo-carcasa,  $R$  es la relación de capacidades caloríficas del fluido de los tubos respecto al que circula por la carcasa.

$$R = \frac{C_t}{C_s} \quad (4.1.11)$$

$NTU_t$ : para un intercambiador tubo-carcasa,  $NTU_t$  se define como la relación entre la conductividad total y la capacidad calorífica del fluido que circula por los tubos.

$$NTU_t = \frac{UA}{C_t} \quad (4.1.12)$$





### 5.1.2.3 Diferencia de temperatura media logarítmica y factor de corrección

La diferencia de temperatura media logarítmica (LMTD) es el principal factor de transferencia de calor cuando las corrientes de los dos fluidos están en contracorriente. Sin embargo, debido a diversos factores, los intercambiadores se diseñan en configuraciones distintas al flujo contracorriente. La diferencia de temperatura media real en esos casos difiere de la LMTD en un cierto factor dependiente de la disposición de los flujos y las temperaturas finales. Se denomina factor de corrección de la diferencia de temperatura media logarítmica,  $F$ .

$$q = UA\Delta t_m = UAF\Delta t_{lm} \quad (4.1.13)$$

La expresión para la diferencia de temperatura media logarítmica es

$$LMTD = \Delta t_{lm} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln(\Delta t_1 / \Delta t_2)} \quad (4.1.14)$$

con

$$\Delta t_1 = t_{h,i} - t_{c,o} = T_1 - t_2 \quad \Delta t_2 = t_{h,o} - t_{c,i} = T_2 - t_1$$

También es posible su cálculo mediante el siguiente nomograma

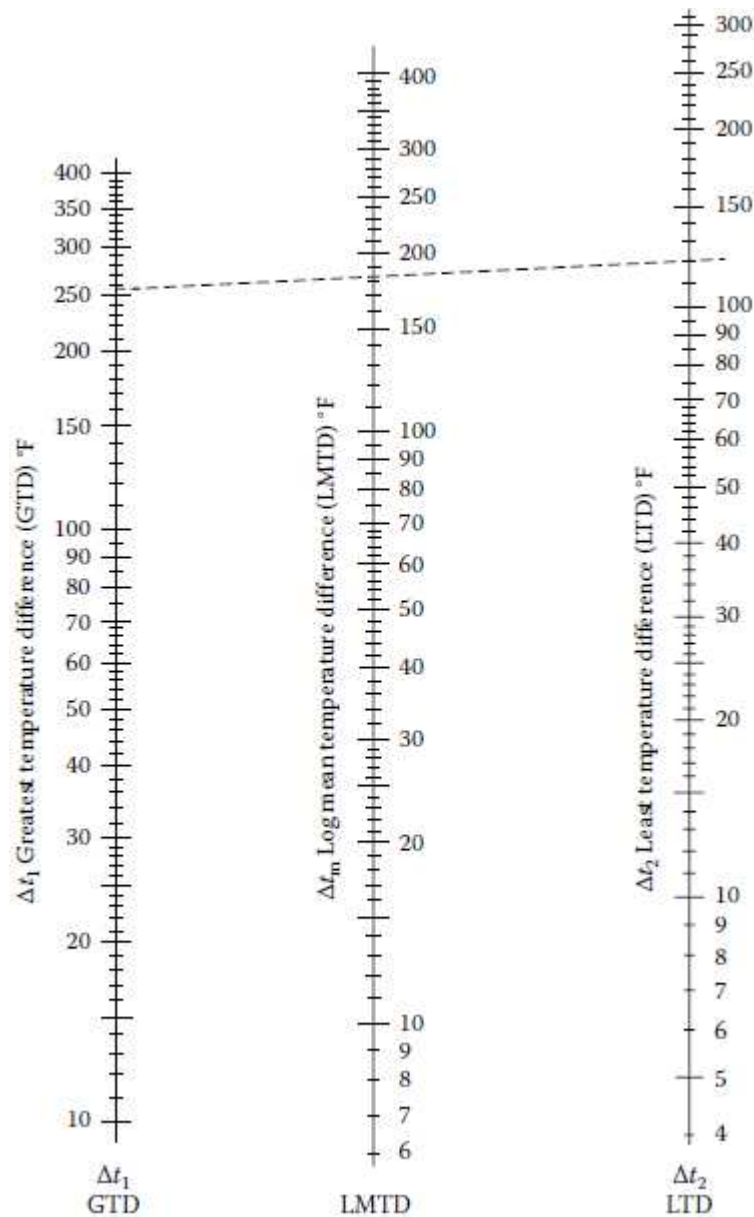


Figura 58. Nomograma para el cálculo de la LMTD.

#### Factor de corrección, $F$ .

El factor de corrección depende de la disposición de los fluidos, R y P. Se puede calcular analíticamente, pero existen gráficas predeterminadas para facilitar su cálculo [18]. Si el factor de corrección es menor que 0.8 se recomienda cambiar de configuración, aumentando el número de pasos, para hacer el intercambiador más eficiente.

Las ecuaciones analíticas para su determinación son:



$$S = \frac{(T_{out}^c - T_{in}^c)}{(T_{in}^h - T_{in}^c)} \quad (4.1.15)$$

$$R = \frac{(T_{in}^h - T_{out}^h)}{(T_{out}^c - T_{in}^c)} \quad (4.1.16)$$

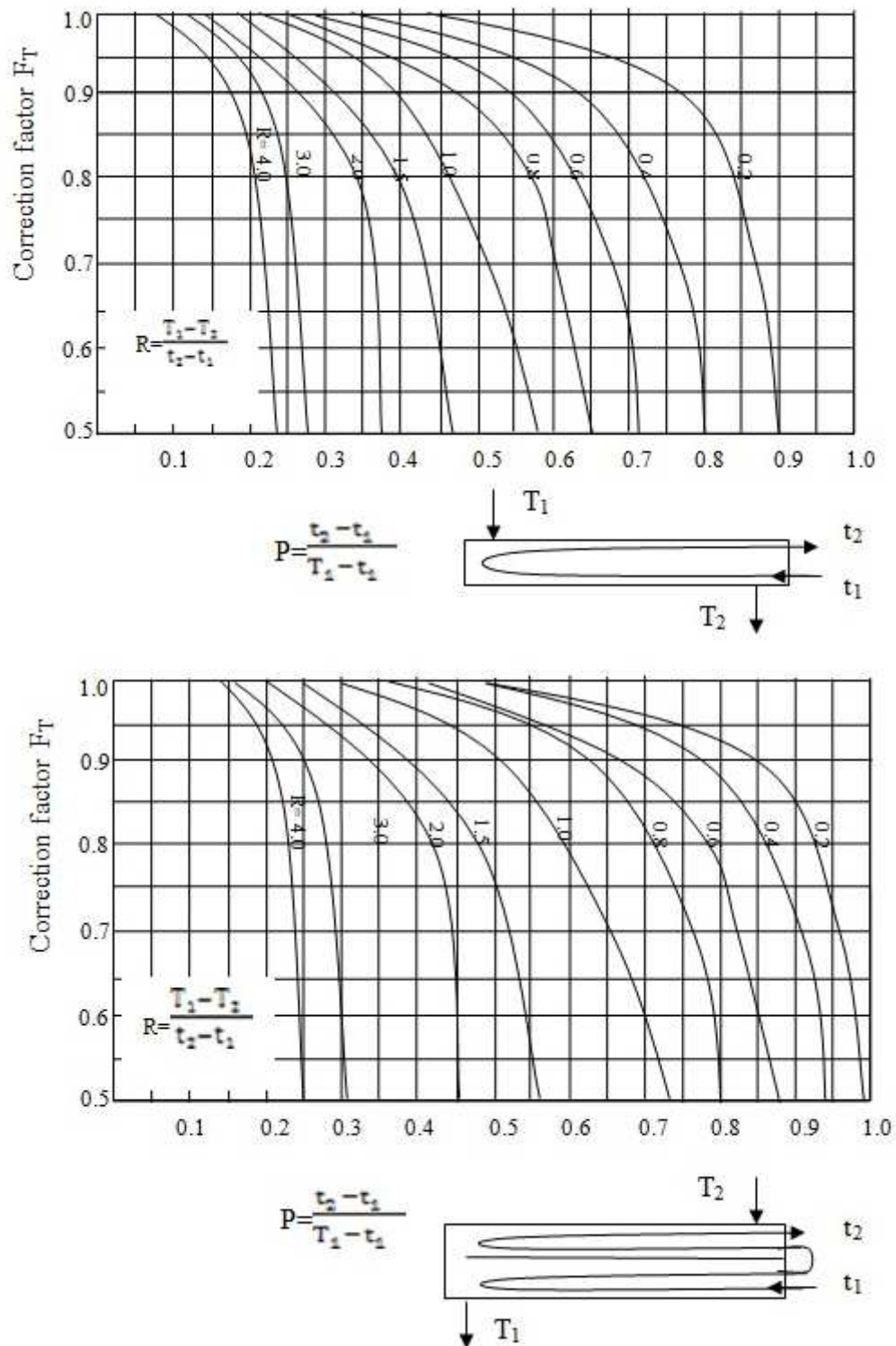
$$P_x = \frac{1 - \left[ \frac{RS - 1}{S - 1} \right]^{1/N_s}}{R - \left[ \frac{RS - 1}{S - 1} \right]^{1/N_s}} \quad (4.1.17)$$

$$F_t = \left( \frac{\sqrt{R^2 + 1}}{R - 1} \right) \times \frac{\ln \left( \frac{1 - P_x}{1 - RP_x} \right)}{\ln \left[ \frac{\left( \frac{2}{P_x} \right) - 1 - R + \sqrt{R^2 + 1}}{\left( \frac{2}{P_x} \right) - 1 - R - \sqrt{R^2 - 1}} \right]} \quad (4.1.18)$$

siendo  $N_s$  el número de pasos de los tubos por la carcasa.

También se puede obtener mediante gráficas, como las que aparecen a continuación.

## DISEÑO BAJO NORMA TEMA DE INTERCAMBIADORES TUBO-CARCASA

Figura 59. Gráficas para obtener el factor de corrección,  $F$ .



En general, el método  $\epsilon$ -NTU se utiliza para el diseño de intercambiadores compactos y el método LMTD para el diseño de intercambiadores tubo-carcasa. Cualquiera de los métodos da lugar a idénticos resultados.

Es posible encontrar más detalles de los métodos de cálculo para la eficiencia térmica en [1] y [19].

#### 5.1.2.4 $\Psi$ -P

En este método se introduce un nuevo parámetro,  $\Psi$ , que representa la relación entre la diferencia de temperatura media real y la diferencia de temperatura a la entrada de ambos fluidos.

$$\Psi = \frac{\Delta t_m}{t_{h,i} - t_{c,i}} = \frac{\Delta t_m}{T_1 - t_1} \quad (4.1.19)$$

La transferencia de calor viene dada por

$$q = UA\Psi(t_{h,i} - t_{c,i}) = UA\Psi(T_1 - t_1) \quad (4.1.20)$$

Cualquiera de los cuatro métodos se puede utilizar para intercambiadores tubo-carcasa. Los valores de eficiencias térmicas se obtienen de distintas gráficas, en función de los parámetros adimensionales  $R$ ,  $P$  o  $NTU$ .

### 5.1.3 Coeficiente de transferencia de calor

Es una medida de la conductividad térmica. En los intercambiadores de calor existe un coeficiente de transferencia del interior de los tubos, y otro del exterior de los tubos.

#### 5.1.3.1 Coeficiente de convección de los tubos, $h_t$

Es el coeficiente que indica cómo de buena es la conductividad del fluido que circula por el interior de los tubos con la pared de los mismos. También conocido como coeficiente de película. Se mide en  $W/m^2K$ .

Se puede definir como

$$h_t = \frac{Nu k}{D_{ti}} \quad (4.1.21)$$

donde

$Nu$  es el número de Nusselt en el interior del tubo



$k$  es la conductividad térmica del fluido que circula por los tubos

$D_{ti}$  es el diámetro interno del tubo

### 5.1.3.2 Coeficiente de convección de la carcasa, $h_s$ (shell)

Del mismo modo, se define el coeficiente de convección de la carcasa para el fluido que circula ella, es decir, el exterior de los tubos.

$$h_s = \frac{Nu k}{D_h} \quad (4.1.21)$$

donde

$Nu$  es el número de Nusselt en el exterior de los tubos

$k$  es la conductividad térmica del fluido que circula por la carcasa

$D_h$  es el diámetro hidráulico entre los tubos

### 5.1.3.3 Coeficiente de transferencia de calor global, $U$

Mide la capacidad de transferencia de calor de un fluido a otro en este caso. Se define como la inversa de la resistencia térmica, se mide en  $W/m^2K$ .

$$U = \frac{1}{\left( \frac{D_t}{D_{ti}} \frac{1}{h_t} + \frac{D_t}{D_{ti}} R_{ft} + \frac{D_t \ln(D_t/D_{ti})}{k_w} + R_{fs} + \frac{1}{h_s} \right)} \quad (4.1.22)$$

donde

$D_t$  es el diámetro exterior de los tubos

$D_{ti}$  es el diámetro interior de los tubos

$h_t$  es el coeficiente de convección en el interior de los tubos

$h_s$  es el coeficiente de convección en el exterior de los tubos

$R_{ft}$  es el factor de fouling en el interior de los tubos

$R_{fs}$  es el factor de fouling en el exterior de los tubos

$k_w$  es la conductividad térmica del material del que están fabricados los tubos

## 5.2 MÉTODOS DE DISEÑO

### 5.2.1 Método Kern

Es un método que se ha utilizado en la industria durante muchos años. Las correlaciones para la transferencia de calor y la pérdida de carga se obtuvieron de intercambiadores



estándar con un corte del deflector del 25% (que es el mejor diseño en muchos casos) [20].

Para la transferencia de calor, la predicción varía entre un valor ligeramente superior y uno mucho inferior al real. Para la pérdida de carga se obtienen valores con errores superiores al 100% del lado de la seguridad.

En la actualidad no se utiliza como método de diseño debido a los elevados errores en el cálculo de la pérdida de carga, lo que puede llevar a intercambiadores con baja transferencia de calor respecto a la que se podría obtener.

### 5.2.2 Método Bell-Delaware

Es un método para calcular la pérdida de carga en la carcasa así como el coeficiente convectivo del lado de la carcasa de los intercambiadores tubo-carcasa. Debe su nombre a que el método se desarrolló en la universidad de Delaware y uno de los principales investigadores fue Kenneth J. Bell, de ahí que tome el nombre de Bell-Delaware.

Se utilizan correlaciones empíricas para el coeficiente convectivo de la carcasa y el factor de fricción en flujos perpendiculares a un haz de tubos, son denominadas correlaciones ideales para un haz de tubos [11], [17] y [21]. En los intercambiadores con deflectores transversales este flujo solamente se da en determinadas partes del intercambiador, las secciones que se encuentran entre los deflectores. En las ventanas de los deflectores el flujo es parcialmente paralelo a los tubos. Además, sólo una parte del flujo que circula por la carcasa sigue la corriente principal, ya que se producen fugas entre los deflectores, los tubos y la carcasa. Estas fugas están consideradas en un conjunto de factores de corrección empíricos, que se aplican al coeficiente convectivo y a la pérdida de carga.

### 5.2.3 Software comerciales

Existen multitud de software comerciales para el diseño de intercambiadores tubo-carcasa entre los que destacan HTFS/Aspen ([www.aspentech.com](http://www.aspentech.com)), B-JAC ([www.aspentech.com](http://www.aspentech.com)), ProMax ([www.bre.com](http://www.bre.com)), HTRI Xchanger Suite ([www.htri-net.com](http://www.htri-net.com)) y HEXTRAN ([www.simsci-esscor.com](http://www.simsci-esscor.com)).



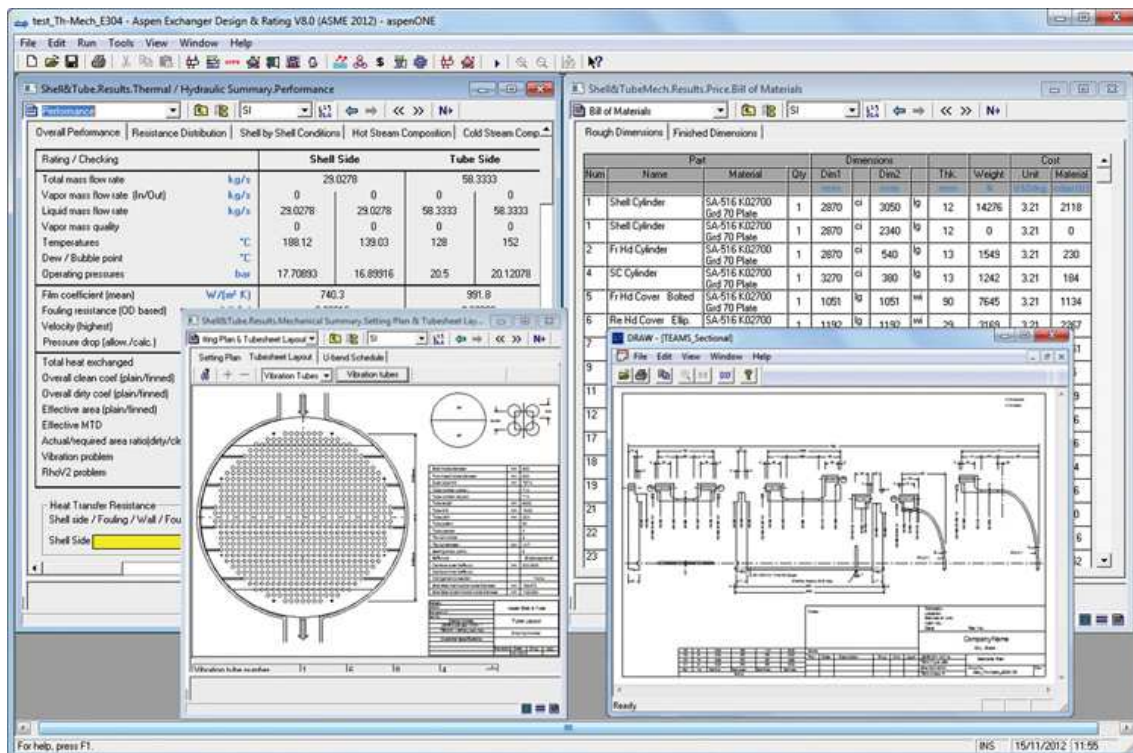


Figura 60. Software de AspenTech, para el cálculo de intercambiadores de calor.

### 5.3 MÉTODO BELL-DELAWARE DETALLADO

Es el método utilizado en este trabajo, consiste en la obtención del coeficiente de convección en la carcasa y de la pérdida de carga en la carcasa ideales, y la aplicación de unos factores de corrección dependientes de la geometría. En ellos se tienen en cuenta las distintas corrientes y fugas no deseadas que se producen en el interior de la carcasa, disminuyendo la eficiencia respecto al caso ideal.

En nuestro caso partimos de unos datos geométricos iniciales:

$D_{ti}$ : diámetro interior de los tubos

$D_t$ : diámetro exterior de los tubos

$L_{tp}$ : es la separación entre dos tubos consecutivos (*tube pitch*)

$B_c$ : corte de los deflectores (en porcentaje del diámetro de la carcasa)

*disposición de los tubos*: tipo de cabezal, separación entre tubos y *layout*

$R_{fi}$ : factor de fouling en el interior de los tubos

$R_{fo}$ : factor de fouling en el exterior de los tubos

$k_w$ : conductividad del material de los tubos



### 5.3.1 Cálculo de parámetros principales

Es necesario determinar diversos parámetros geométricos, el orden de su obtención será función de la restricción de la que se parta:

$N_{tt}$ : es el número total de tubos que componen el intercambiador. Depende del diámetro de la carcasa y la disposición de los tubos. Se puede obtener de la siguiente ecuación

$$N_{tt} = \left( \frac{D_s - m_1}{m_3 D_t} \right)^n \quad (4.3.1)$$

donde

$$m_3 = (m_2 + 1)/(K_1)^{1/n} \quad (4.3.2)$$

$D_{otl}$ : es el diámetro del círculo que circunscribe todos los tubos del haz de tubos. Depende del número de tubos y de su disposición. Sinnott [22] plantea la siguiente ecuación para su cálculo.

$$D_{otl} = D_t (N_{tt}/K_1)^{1/n} \quad (4.3.3)$$

Los valores de  $K_1$ ,  $n$ ,  $m_1$  y  $m_2$  se pueden obtener de las siguientes tablas:

tube bundle type	$m_1$	$m_2$
fixed or U-tube	8	0.01
outside packing	39	0
split-ring	44	0.025
pull-through	87	0.007

Tabla 7. Valores de las constantes  $m_1$  y  $m_2$  para la obtención de  $L_{bb}$ .

tube passes	$K_1$		$n$	
	triangular	square	triangular	square
1	0.319	0.215	2.142	2.207
2	0.249	0.156	2.207	2.291
4	0.175	0.158	2.285	2.263
6	0.0743	0.0402	2.499	2.617
8	0.0365	0.0331	2.675	2.643

Tabla 8. Constantes para la ecuación de Sinnott [22] para una relación de  $L_{tp}/D_t = 1.25$ .



$D_{ctl}$ : es el diámetro de la circunferencia que pasa por los centros de los tubos del haz más externos

$$D_{ctl} = D_{otl} - d_t \quad (4.3.4)$$

$L_{tp,eff}$ : es la separación de los tubos respecto a la dirección de la corriente y depende de la disposición de los tubos

$$\begin{aligned} L_{tp,eff} &= L_{tp} && \text{for } 30^\circ \text{ and } 90^\circ \text{ layouts} \\ &= 0.707L_{tp} && \text{for } 45^\circ \text{ layouts} \end{aligned} \quad (4.3.5)$$

siendo  $L_{tp}$  la separación real entre los tubos (*tube pitch*).

$L_{bb}$ : es la holgura entre el haz de tubos y la carcasa.

$$L_{bb} = D_s - D_{otl} \quad (4.3.6)$$

$L_{ts}$ : es el espesor de la placa tubular (*tubesheet thickness*), debe ser mayor que 25 mm para evitar fugas. Depende del diámetro de la carcasa del siguiente modo

$$L_{ts} = 0.1D_s \quad (4.3.7)$$

$L_{tt}$ : es la longitud total de los tubos, desde la entrada al intercambiador a la salida.

$L_{ta}$ : es la longitud de los tubos en la que se produce transferencia de calor, es decir, la longitud total de los tubos menos la parte de los tubos que se encuentra en el interior de la placa tubular.

$$L_{tt} = L_{ta} + 2L_{ts} \quad (4.3.8)$$

$R_{bs}$ : es la relación entre la separación de los deflectores y el diámetro de la carcasa. Suele tomar valores entre 0.2 y 1.

$L_{bc}$ : es la separación entre los deflectores, se puede obtener una vez conocido  $R_{bs}$  mediante

$$R_{bs} = L_{bc}/D_s \quad (4.3.9)$$

$N_b$ : es el número de deflectores, se puede calcular una vez conocida la longitud del intercambiador y la separación entre los deflectores.



$$N_b = \frac{L_{ta} - (L_i + L_o)L_{bc}}{L_{bc}} + 1 \quad (4.3.10)$$

$v_t$ : es la velocidad del fluido en los tubos

$$v_t = \frac{M_t N_{tp}}{\pi \rho_t D_{ti}^2 N_{tt}} \quad (4.3.11)$$

En cuanto a la geometría relacionada con los deflectores, encontramos:

$\theta_{ds}$ : es el ángulo subtendido por el corte del deflector y el diámetro interior de la carcasa

$$\theta_{ds} = 2 \cos^{-1} \left( 1 - \frac{2B_c}{100} \right) \quad (4.3.12)$$

$\theta_{ctl}$ : es el ángulo subtendido por el corte de deflector y el diámetro que atraviesa los centros de los tubos más externos del haz de tubos ( $D_{ctl}$ )

$$\theta_{ctl} = 2 \cos^{-1} \left[ \frac{D_s}{D_{ctl}} \left( 1 - \frac{2B_c}{100} \right) \right] \quad (4.3.13)$$

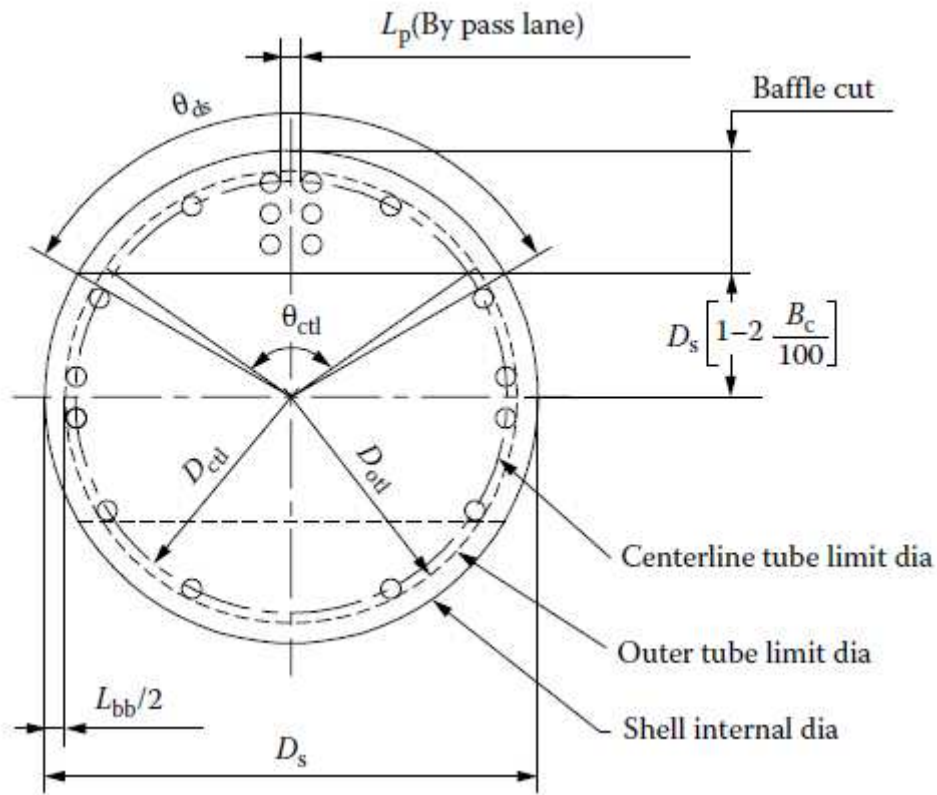


Figura 61. Parámetros geométricos de un haz de tubos.

$S_m$ : es el área existente entre dos deflectores consecutivos en la que el flujo es perpendicular a los tubos

$$S_m = L_{bc} \left[ L_{bb} + \frac{D_{ctl}}{L_{tp,eff}} (L_{tp} - d) \right] \quad (4.3.14)$$

Se puede obtener de la misma la velocidad del fluido en la carcasa

$$v_s = \frac{M_s}{\rho_s S_m} \quad (4.3.15)$$

Siendo  $M_s$  el caudal másico del fluido que circula por la carcasa y  $\rho_s$  su densidad.

$F_w$ : es la fracción del número de tubos que se encuentran en la ventana del deflector

$$F_w = \frac{\theta_{ctl}}{2\pi} - \frac{\sin \theta_{ctl}}{2\pi} \quad (4.3.16)$$



Se puede definir a partir de  $F_w$ ,  $N_{tw}$ , que es el número de tubos en la ventana del deflector.

$$N_{tw} = N_t F_w \quad (4.3.17)$$

La fracción de tubos que se encuentran en flujo perpendicular,  $F_c$ , es por tanto

$$F_c = 1 - 2F_w \quad (4.3.18)$$

Se pueden definir también el número de filas de tubos en flujo perpendicular,  $N_{tcc}$ , así como el número de filas de tubos en la ventana del deflector,  $N_{tcw}$ .

$$N_{tcc} = \frac{D_s}{L_{pp}} \left( 1 - \frac{2B_c}{100} \right) \quad (4.3.19)$$

$$N_{tcw} = \frac{0.8}{L_{pp}} \left[ \frac{D_s B_c}{100} - \frac{D_s - D_{ctl}}{2} \right] \quad (4.3.20)$$

### 5.3.2 Áreas de paso

Debido a la disposición de los tubos y los deflectores quedan determinadas las siguientes áreas características.

#### 5.3.2.1 Área de flujo perpendicular

$S_m$ : es el área mínima de paso existente entre dos deflectores consecutivos, en la que el flujo es perpendicular a los tubos

$$S_m = L_{bc} \left[ L_{bb} + \frac{D_{ctl}}{L_{tp,eff}} (L_{tp} - d) \right] \quad (4.3.21)$$



### 5.3.2.2 Área neta de la ventana del deflector

$S_{wg}$ : es el área de la ventana del deflector

$$S_{wg} = \frac{\pi}{4} D_s^2 \left( \frac{\theta_{ds}}{2\pi} - \frac{\sin \theta_{ds}}{2\pi} \right) \quad (4.3.22)$$

$S_{wt}$ : es el área de la ventana del deflector ocupada por los tubos

$$S_{wt} = N_t F_w \frac{\pi}{4} d^2 \quad (4.3.23)$$

Quedando el área neta en la ventana del deflector,  $S_w$ , como la diferencia entre el área de la ventana y el área ocupada por los tubos.

$$S_w = S_{wg} - S_{wt} \quad (4.3.24)$$

### 5.3.2.3 Área entre los deflectores y los tubos

Los agujeros en los deflectores tienen cierta holgura con los tubos, lo que permite a parte del fluido que circula por la carcasa pasar a través del deflector.

El área total de holgura entre los tubos y el deflector para un deflector viene dada por

$$S_{tb} = 0.5\pi D_o \delta_{tb} n_t (1 + F_c) \quad (4.3.25)$$

siendo  $F_c$  la fracción de tubos que se encuentran en flujo perpendicular,  $n_t$  el número total de tubos y  $\delta_{tb}$  la holgura entre los tubos y el deflector.

La holgura entre tubos y deflector,  $\delta_{tb}$ , se encuentra en las especificaciones de TEMA. Depende del diámetro de los tubos y la separación entre deflectores. Para tubos con un diámetro superior a 1.25 in. (31.75 mm),  $\delta_{tb}$  toma el valor de 0.4mm. Para tubos de un diámetro igual o inferior a 1.25 in., la holgura depende de la mayor longitud de tubo sin sujeción, que suelen ser los tubos que pasan a través de las ventanas de los deflectores. Es la longitud de dos veces la separación entre deflectores centrales. Si esta longitud es menor que 3 ft. (914.4 mm), la holgura  $\delta_{tb}$  será 0.4 mm, en caso contrario será de 0.2mm.



#### 5.3.2.4 Área entre la carcasa y los deflectores

Es el área que se encuentra entre los deflectores y la carcasa debido a la holgura existente entre ambos, viene determinada por

$$S_{sb} = \pi D_s \delta_{sb} \left( \frac{2\pi - \theta_{ds}}{2\pi} \right) \quad (4.3.26)$$

Siendo  $\delta_{sb}$  la holgura entre la carcasa y los deflectores. Tiene que ver con las tolerancias en la fabricación. La holgura media especificada en TEMA es una función lineal del diámetro de la carcasa.

$$\delta_{sb}(\text{mm}) = 0.8 + 0.002D_s(\text{mm}) \quad (4.3.27)$$

Se suele añadir un coeficiente de seguridad de +0.75 mm, para tener en cuenta la tolerancia en la redondez de la carcasa y los deflectores.

#### 5.3.2.5 Área entre el haz de tubos y la carcasa

Es el área entre los tubos exteriores del haz de tubos y la carcasa

$$S_b = L_{bc}(D_s - D_{otl}) \quad (4.3.28)$$

siendo  $L_{bc}$  la separación entre dos deflectores consecutivos.

### 5.3.3 Viscosidad de los fluidos

La viscosidad de los fluidos varía con la temperatura, por lo que es necesario obtener los valores de viscosidad de ambos fluidos a la temperatura de la pared de los tubos,  $\mu_{tw}$  y  $\mu_{sw}$ . Estos valores se utilizarán para calcular los factores de corrección  $\phi_t$  y  $\phi_s$ , respectivamente.

$$(\phi_s)^n = \left( \frac{\mu_s}{\mu_w} \right)^{0.14} \quad (4.3.29)$$

Y siendo la temperatura de la pared,  $T_w$

$$T_w = T_{t,av} + \frac{T_{s,av} - T_{t,av}}{1 + h_t/h_s} \quad (4.3.30)$$





## DISEÑO BAJO NORMA TEMA DE INTERCAMBIADORES TUBO-CARCASA

con  $T_{s,av}$  y  $T_{t,av}$  la temperatura media del fluido que circula por la carcasa y por los tubos, respectivamente.

Se pueden consultar los factores de conversión entre distintas unidades de viscosidad en la siguiente tabla:

VISCOSITY CONVERSION FACTORS						
	centipoises	poises = $\frac{gm}{cm-sec}$	$\frac{lb}{ft-sec}$	$\frac{lb-sec}{ft^2}$	$\frac{lb}{ft-hr}$	$\frac{kg-sec}{m^2}$
centipoises	1	.01	.000672	.0000209	2.42	.000102
poises = $\frac{gm}{cm-sec}$	100	1	.0672	.00209	242	.0102
$\frac{lb}{ft-sec}$	1488	14.88	1	.0311	3600	.1517
$\frac{lb-sec}{ft^2}$	47900	479	32.2	1	116000	4.88
$\frac{lb}{ft-hr}$	.413	.00413	.000278	.00000864	1	.0000421
$\frac{kg-sec}{m^2}$	9810	98.1	6.59	.2048	23730	1

Tabla 9. Factores de conversión de unidades para la viscosidad.

El valor de la viscosidad cinemática, se puede obtener de la ecuación de Walther [23]

$$\log_{10}[\log_{10}(\nu + \lambda)] = A - B \log_{10}(T) \quad (4.3.31)$$

siendo  $\lambda$  una constante, (0.7 cSt), a partir de dos valores conocidos de viscosidad cinemática a distintas temperaturas, pudiendo obtener los parámetros A y B.

A partir del mismo, se puede obtener el valor de la viscosidad dinámica, conociendo la densidad del fluido.

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (4.3.32)$$

TEMA proporciona diversas gráficas, además de un diagrama acompañado de una tabla, a partir de las cuales se puede obtener la viscosidad a distintas temperaturas para diversos fluidos.



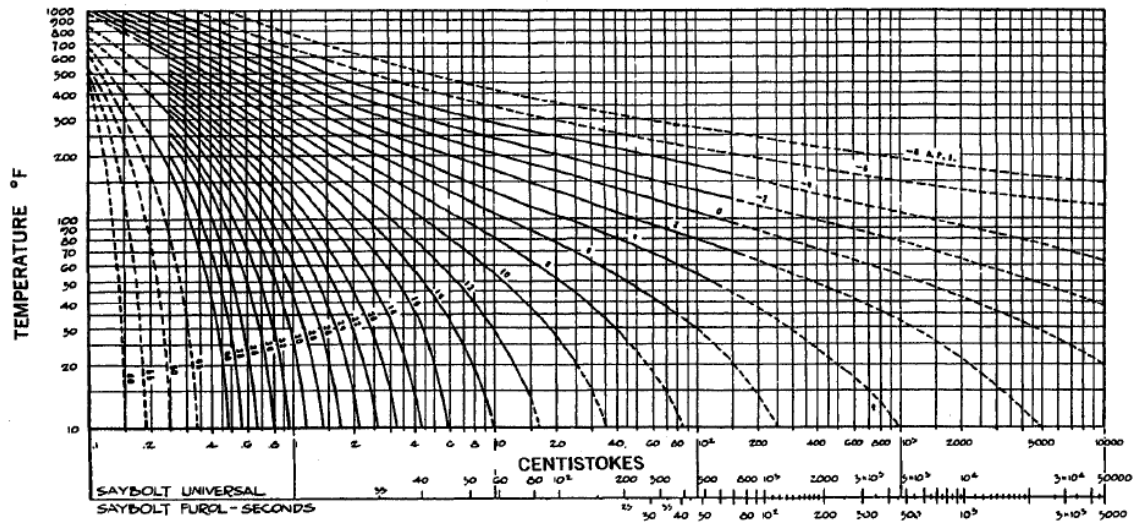
## DISEÑO BAJO NORMA TEMA DE INTERCAMBIADORES TUBO-CARCASA

**VISCOSITY — TEMPERATURE RELATIONSHIP FOR PETROLEUM OILS**

LINES OF CONSTANT DEGREES A.P.I.

CHARACTERIZATION FACTOR,  $K = 10.0$ 

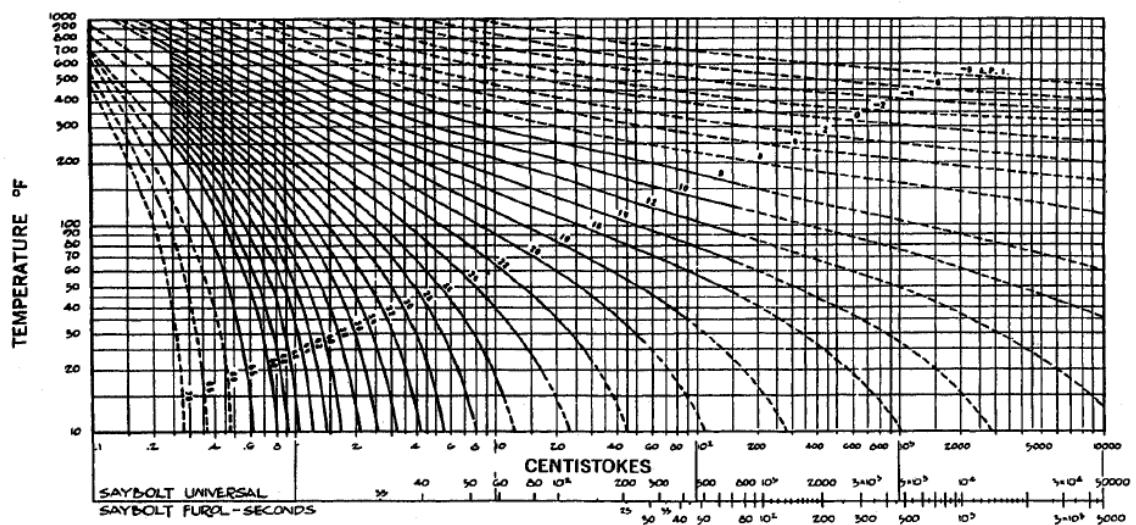
Ref: Watson, Wien &amp; Murphy, Industrial &amp; Engineering Chemistry 28,605-9 (1936)

**VISCOSITY — TEMPERATURE RELATIONSHIP FOR PETROLEUM OILS**

LINES OF CONSTANT DEGREES A.P.I.

CHARACTERIZATION FACTOR,  $K = 11.0$ 

Ref: Watson, Wien &amp; Murphy, Industrial &amp; Engineering Chemistry 28,605-9 (1936)





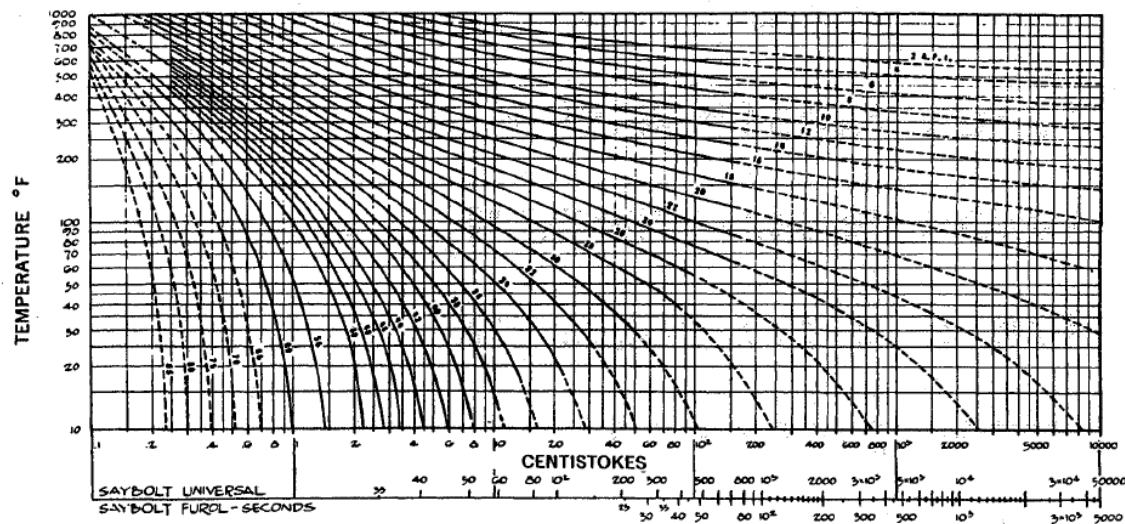
## DISEÑO BAJO NORMA TEMA DE INTERCAMBIADORES TUBO-CARCASA

**VISCOSITY — TEMPERATURE RELATIONSHIP FOR PETROLEUM OILS**

LINES OF CONSTANT DEGREES A.P.I.

CHARACTERIZATION FACTOR,  $K = 11.8$ 

Ref: Watson, Wien &amp; Murphy, Industrial &amp; Engineering Chemistry 28,605-9 (1936)

**VISCOSITY — TEMPERATURE RELATIONSHIP FOR PETROLEUM OILS**

LINES OF CONSTANT DEGREES A.P.I.

CHARACTERIZATION FACTOR,  $K = 12.5$ 

Ref: Watson, Wien &amp; Murphy, Industrial &amp; Engineering Chemistry 28,605-9 (1936)

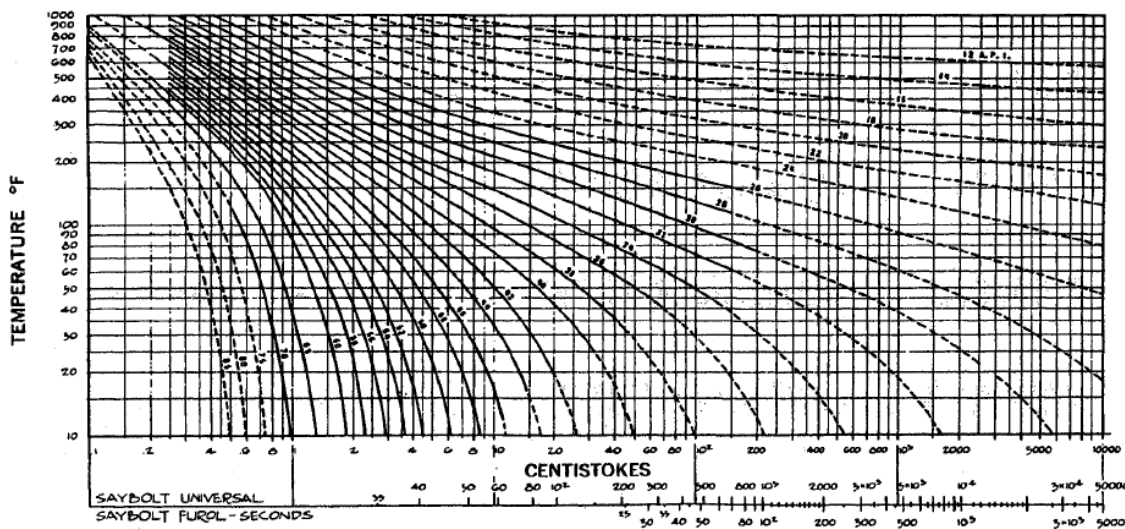


Figura 62. Gráficas de la viscosidad en función de la temperatura para derivados del petróleo, TEMA [4].





## DISEÑO BAJO NORMA TEMA DE INTERCAMBIADORES TUBO-CARCASA

No.	Liquid	X	Y	No.	Liquid	X	Y
1	Acetaldehyde	15.2	4.8	56	Freon-22	17.2	4.7
2	Acetic acid, 100 %	12.1	14.2	57	Freon-113	12.5	11.4
3	Acetic acid, 70 %	9.5	17.0	58	Glycerol, 100 %	2.0	30.0
4	Acetic anhydride	12.7	12.8	59	Glycerol, 50 %	6.9	19.6
5	Acetone, 100 %	14.5	7.2	60	Heptene	14.1	8.4
6	Acetone, 35 %	7.9	15.0	61	Hexane	14.7	7.0
7	Allyl alcohol	10.2	14.3	62	Hydrochloric acid, 31.5 %	13.0	16.6
8	Ammonia, 100 %	12.6	2.0	63	Isobutyl alcohol	7.1	18.0
9	Ammonia, 26 %	10.1	13.9	64	Isobutyric acid	12.2	14.4
10	Amyl acetate	11.8	12.5	65	Isopropyl alcohol	8.2	16.0
11	Amyl alcohol	7.5	18.4	66	Kerosene	10.2	16.9
12	Aniline	8.1	18.7	67	Linseed oil, raw	7.5	27.2
13	Anisole	12.3	13.5	68	Mercury	18.4	16.4
14	Arsenic trichloride	13.9	14.5	69	Methanol, 100 %	12.4	10.5
15	Benzene	12.5	10.9	70	Methanol, 90 %	12.3	11.8
16	Brine, CaCl <sub>2</sub> , 25 %	6.6	15.9	71	Methanol, 40 %	7.8	15.5
17	Brine, NaCl, 25 %	10.2	16.6	72	Methyl acetate	14.2	8.2
18	Bromine	14.2	13.2	73	Methyl chloride	15.0	3.8
19	Bromotoluene	20.0	15.9	74	Methyl ethyl ketone	13.9	8.6
20	Butyl acetate	12.3	11.0	75	Naphthalene	7.9	18.1
21	Butyl alcohol	8.6	17.2	76	Nitric acid, 95 %	12.8	13.8
22	Butyric acid	12.1	15.3	77	Nitric acid, 60 %	10.8	17.0
23	Carbon dioxide	11.6	0.3	78	Nitrobenzene	10.6	16.2
24	Carbon disulphide	16.1	7.5	79	Nitrotoluene	11.0	17.0
25	Carbon tetrachloride	12.7	13.1	80	Octane	13.7	10.0
26	Chlorobenzene	12.3	12.4	81	Octyl alcohol	6.6	21.1
27	Chloroform	14.4	10.2	82	Pentachloroethane	10.9	17.3
28	Chlorosulfonic acid	11.2	18.1	83	Pentane	14.9	5.2
29	Chlorotoluene, ortho	13.0	13.3	84	Phenol	6.9	20.8
30	Chlorotoluene, meta	13.3	12.5	85	Phosphorus tribromide	13.8	16.7
31	Chlorotoluene para	13.3	12.5	86	Phosphorus trichloride	16.2	10.9
32	Cresol, meta	2.5	20.8	87	Propionic acid	12.8	13.8
33	Cyclohexanol	2.9	24.3	88	Propyl alcohol	9.1	16.5
34	Dibromoethane	12.7	15.8	89	Propyl bromide	14.5	9.6
35	Dichloroethane	13.2	12.2	90	Propyl chloride	14.4	7.5
36	Dichloromethane	14.6	8.9	91	Propyl iodide	14.1	11.6
37	Diethyl oxalate	11.0	16.4	92	Sodium	16.4	13.9
38	Dimethyl oxalate	12.3	15.8	93	Sodium hydroxide, 50 %	3.2	25.8
39	Diphenyl	12.0	18.3	94	Stannic chloride	13.5	12.8
40	Dipropyl oxalate	10.3	17.7	95	Sulphur dioxide	15.2	7.1
41	Ethyl acetate	13.7	9.1	96	Sulphuric acid, 110 %	7.2	27.4
42	Ethyl alcohol, 100 %	10.5	13.8	97	Sulphuric acid, 98 %	7.0	24.8
43	Ethyl alcohol, 95 %	9.8	14.3	98	Sulphuric acid, 60 %	10.2	21.3
44	Ethyl alcohol, 40 %	6.5	16.6	99	Sulphuric chloride	15.2	12.4
45	Ethyl benzene	13.2	11.5	100	Tetrachloroethane	11.9	15.7
46	Ethyl bromide	14.5	8.1	101	Tetrachloroethylene	14.2	12.7
47	Ethyl chloride	14.8	6.0	102	Titanium tetrachloride	14.4	12.3
48	Ethyl ether	14.5	5.3	103	Toluene	13.7	10.4
49	Ethyl formate	14.2	8.4	104	Trichloroethylene	14.8	10.5
50	Ethyl iodide	14.7	10.3	105	Turpentine	11.5	14.9
51	Ethylene glycol	6.0	23.6	106	Vinyl acetate	14.0	8.8
52	Formic acid	10.7	15.8	107	Water	10.2	13.0
53	Freon-11	14.4	9.0	108	Xylene, ortho	13.5	12.1
54	Freon-12	16.8	5.6	109	Xylene, meta	13.9	10.6
55	Freon-21	15.7	7.5	110	Xylene, para	13.9	10.9

Tabla 10. Tabla adjunta al diagrama de la Figura 63. Diagrama para obtener la viscosidad a diversas temperaturas para distintos fluidos.

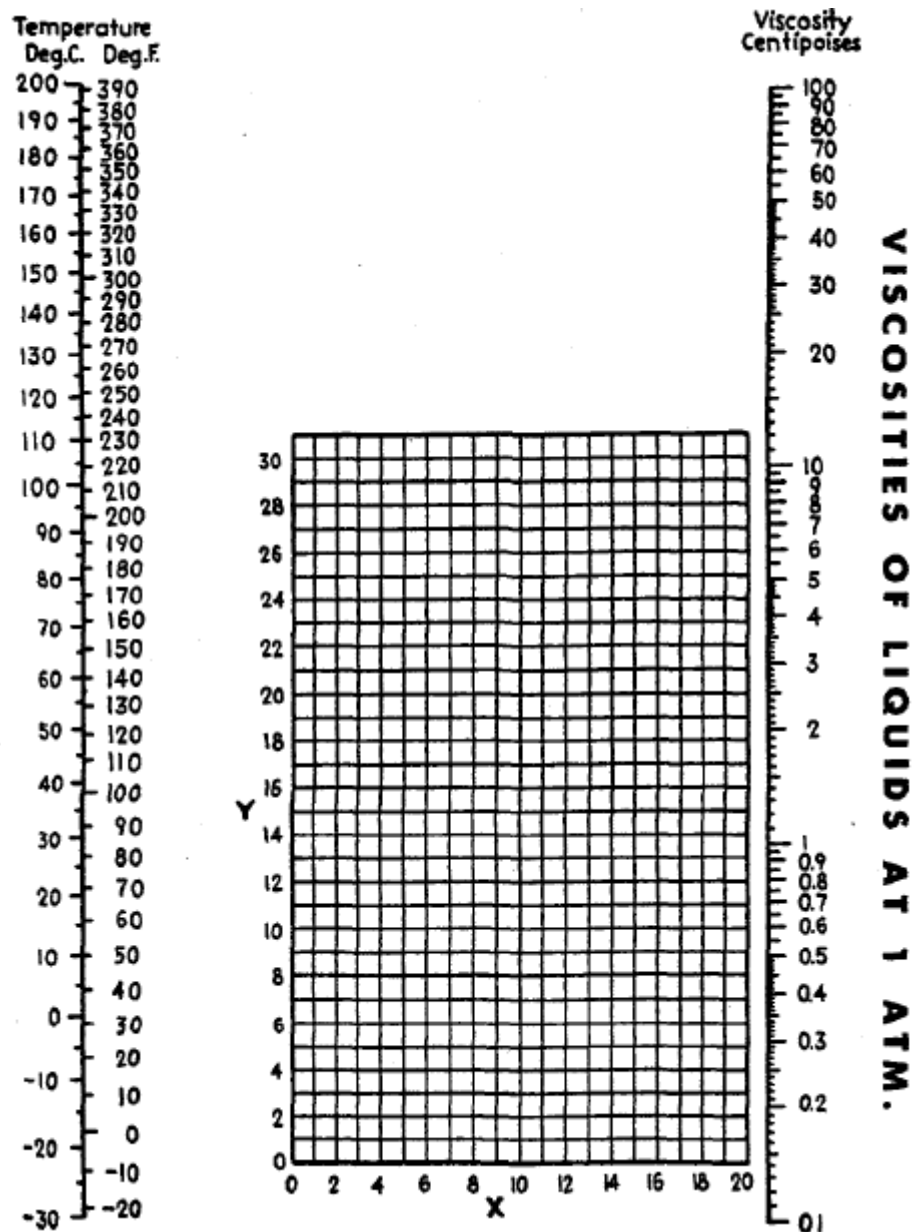


Figura 63. Diagrama para obtener la viscosidad a diversas temperaturas para distintos fluidos [4].

#### 5.3.4 Factores de corrección

Son los factores utilizados en el método Bell-Delaware para tener en consideración las diversas corrientes y fugas no deseadas que se producen en el interior de la carcasa debido a la geometría. Estos factores se aplican a los valores obtenidos para un haz de tubos ideal para obtener los valores del intercambiador real.



El coeficiente de transferencia de calor del fluido que circula por la carcasa,  $h_s$ , se obtiene mediante

$$h_s = h_{si}(J_c J_l J_b J_r J_s) = h_{si} J_{tot} \quad (4.3.33)$$

donde

$J_c$ : es el factor de corrección para el corte del deflector y la separación entre deflectores. Tiene en cuenta que el flujo en la ventana del deflector no es perpendicular como en el intercambiador ideal.

$J_l$ : es el factor de corrección para las fugas, tanto entre la carcasa y los deflectores como entre los tubos y los deflectores.

$J_b$ : es el factor de corrección para las corrientes que se producen entre el haz de tubos y la carcasa.

$J_r$ : es el factor de corrección para el gradiente adverso de temperaturas que se produce cuando el flujo es laminar.

$J_s$ : es el factor de corrección para la separación diferente en las secciones de entrada y salida con respecto a la separación de los deflectores centrales.

$$h_{si} = j_{si} Pr_s^{-2/3} \rho_s C_{ps} v_s (\mu_s / \mu_{sw})^{0.14} \quad (4.3.34)$$

siendo  $j_{si}$

$$j_{si} = a_1 \left( \frac{1.33}{L_{tp}/D_t} \right)^a (Re_s)^{a_2} \quad (4.3.35)$$

$$a = \frac{a_3}{1 + 0.14(Re_s)^{a_4}}$$

Siendo  $Re_s$  el número de Reynolds y  $Pr_s$  el número de Prandtl, del fluido que circula por la carcasa.

$$Pr_s = \frac{\mu_s C_{p,s}}{k_s} \quad (4.3.36)$$

$$Re_s = \frac{\rho_s D_t v_s}{\mu_s} \quad (4.3.37)$$



## DISEÑO BAJO NORMA TEMA DE INTERCAMBIADORES TUBO-CARCASA

Los parámetros  $a$  ( $a_1, a_2, a_3, a_4$ ) dependen del Reynolds del fluido de la carcasa y de la disposición de los tubos (*layout angle*) se obtienen de la siguiente tabla

layout angle	Reynolds number	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$
30°	$10^5-10^4$	0.321	-0.388	1.450	0.519	0.372	-0.123	7.000	0.500
	$10^4-10^3$	0.321	-0.388			0.486	-0.152		
	$10^3-10^2$	0.593	-0.477			4.570	-0.476		
	$10^2-10^1$	1.360	-0.657			45.10	-0.973		
	<10	1.400	-0.667			48.00	-1.000		
45°	$10^5-10^4$	0.370	-0.396	1.930	0.500	0.303	-0.126	6.590	0.520
	$10^4-10^3$	0.370	-0.396			0.333	-0.136		
	$10^3-10^2$	0.730	-0.500			3.500	-0.476		
	$10^2-10^1$	0.498	-0.656			26.20	-0.913		
	<10	1.550	-0.667			32.00	-1.000		
90°	$10^5-10^4$	0.370	-0.395	1.187	0.370	0.3910	-0.148	6.300	0.378
	$10^4-10^3$	0.107	-0.266			0.0815	+0.022		
	$10^3-10^2$	0.408	-0.460			6.0900	-0.602		
	$10^2-10^1$	0.900	-0.631			32.100	-0.963		
	<10	0.970	-0.667			35.000	-1.000		

Figura 64. Parámetros para el cálculo de  $j_{si}$  y  $f_{si}$ .

Existen tres factores de corrección para la pérdida de carga:

$R_b$ : es el factor de corrección para las corrientes que se producen entre el haz de tubos y la carcasa.

$R_i$ : es el factor de corrección para las fugas, tanto entre la carcasa y los deflectores como entre los tubos y los deflectores.

$R_s$ : es el factor de corrección para la separación diferente en las secciones de entrada y salida con respecto a la separación de los deflectores centrales.

#### 5.3.4.1 Factor de corrección de flujo por la ventana del deflector

El factor de corrección  $J_c$  tiene en consideración el flujo que circula por las ventanas de los deflectores, que no es perpendicular a los tubos. Depende del número de tubos en las ventanas respecto al número de tubos en flujo perpendicular, lo que viene determinado por el corte del deflector,  $B_c$ , y la relación  $D_s/D_{ctl}$ . La correlación depende de un solo parámetro,  $F_c$ , la fracción de tubos en flujo perpendicular. Para cortes del deflector entre 15% y 45%,  $J_c$  es:

$$J_c = 0.55 + 0.72F_c \quad (4.3.38)$$

#### 5.3.4.2 Factores de corrección de las fugas en los deflectores

Los factores de corrección  $J_i$  y  $R_i$  expresan los efectos de las fugas entre deflectores y tubos y entre deflectores y carcasa. Dependen de las siguientes relaciones de áreas:



$$r_s = \frac{S_{sb}}{S_{sb} + S_{tb}}$$

$$r_l = \frac{S_{sb} + S_{tb}}{S_m}$$

siendo  $S_{sb}$ ,  $S_{tb}$  y  $S_m$  las áreas entre carcasa y deflectores, entre tubos y deflectores y el área de paso entre dos deflectores consecutivos, definidas anteriormente.

Las correlaciones para ambos factores de corrección son:

$$J_L = 0.44(1 - r_s) + [1 - 0.44(1 - r_s)] \exp(-2.2r_l) \quad (4.3.39)$$

$$R_L = \exp[-1.33(1 + r_s)(r_l)^P] \quad (4.3.40)$$

donde

$$p = 0.8 - 0.15(1 + r_s) \quad (4.3.41)$$

#### 5.3.4.3 Factores de corrección del flujo entre el haz de tubos y la carcasa

Los factores de corrección  $J_b$  y  $R_b$  representan los efectos de las corrientes que circulan entre la carcasa y el haz de tubos. Dependen de la relación  $S_b/S_m$  y de la cantidad de pares de tiras de sellado (*sealing strips*). Es necesaria la introducción de la relación  $r_{ss}$ , que es la relación entre el número de pares de tiras de sellado y el número de filas de tubos en flujo perpendicular,  $N_{tcc}$ .

$$r_{ss} = \frac{N_{ss}}{N_{tcc}} \quad (4.3.42)$$

Las correlaciones para  $J_b$  son:

$$\begin{aligned} J_B &= \exp[-C_J (S_b/S_m) (1 - \sqrt[3]{2r_{ss}})] & r_{ss} < 0.5 \\ J_B &= 1.0 & r_{ss} \geq 0.5 \end{aligned} \quad (4.3.43)$$

donde

$$\begin{aligned} C_J &= 1.35 & Re < 100 \\ &= 1.25 & Re \geq 100 \end{aligned}$$





Las correlaciones para  $R_b$  son:

$$\begin{aligned} R_B &= \exp[-C_R(S_b/S_m)(1 - \sqrt[3]{2r_{ss}})] & r_{ss} < 0.5 \\ R_B &= 1.0 & r_{ss} \geq 0.5 \end{aligned} \quad (4.3.44)$$

donde

$$\begin{aligned} C_R &= 4.5 & Re < 100 \\ &= 3.7 & Re \geq 100 \end{aligned}$$

#### 5.3.4.4 Factores de corrección de la separación desigual de los deflectores

Los factores de corrección  $J_s$  y  $R_s$  dependen de la separación de los deflectores de entrada y salida, de los centrales y del número de deflectores.

El factor  $J_s$  sigue la correlación:

$$J_s = \frac{(N_b - 1) + (L_i^*)^{1-n} + (L_o^*)^{1-n}}{(N_b - 1) + (L_i^* - 1) + (L_o^* - 1)} \quad (4.3.45)$$

con

$$\begin{aligned} n &= 0.6 & Re \geq 100 \\ n &= \frac{1}{3} & Re < 100 \end{aligned}$$

El factor  $R_s$  se puede calcular mediante:

$$R_s = \left( \frac{1}{L_i^*} \right)^{2-n} + \left( \frac{1}{L_o^*} \right)^{2-n} \quad (4.3.46)$$

con

$$\begin{aligned} n &= 0.2 & Re \geq 100 \\ n &= 1.0 & Re < 100 \end{aligned}$$

$L_i^*$  y  $L_o^*$  son las relaciones de la separación de los deflectores de entrada y salida respecto a los centrales.

$$L_i^* = \frac{L_{bi}}{L_{bc}} \quad L_o^* = \frac{L_{bo}}{L_{bc}}$$

Siendo  $L_{bi}$  la separación del deflector de entrada y  $L_{bo}$  la del de salida.

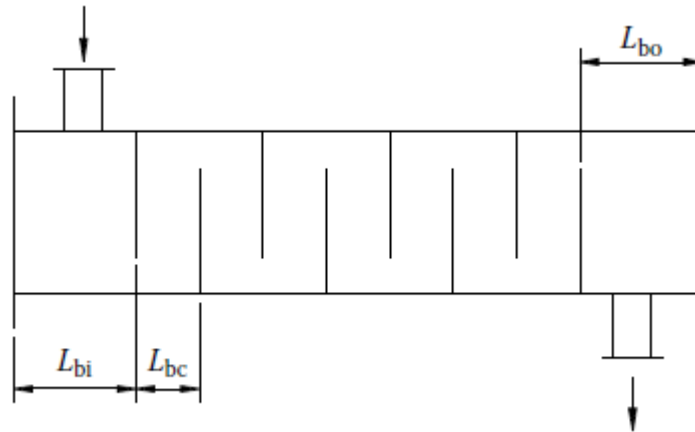


Figura 53. Separación de los deflectores en la entrada y en la salida.

#### 5.3.4.5 Factor de corrección de flujo laminar

El factor de corrección,  $J_r$ , tiene en cuenta que en el caso del flujo laminar, el coeficiente de transferencia de calor desciende aguas abajo. La correlación depende del número de filas de tubos cruzadas en todo el intercambiador,  $N_{ct}$ :

$$N_{ct} = (N_{tcc} + N_{tcw})(N_b + 1) \quad (4.3.47)$$

Las correlaciones para el cálculo de  $J_r$  dependen del Reynolds de la carcasa:

$$\begin{aligned} J_R &= (10/N_{ct})^{0.18} & Re &\leq 20 \\ J_R &= 1.0 & Re &\geq 100 \end{aligned} \quad (4.3.48)$$

Para los valores de Reynolds entre 20 y 100 se realiza interpolación lineal.

### 5.3.5 Coeficientes de convección

#### 5.3.5.1 Coeficiente de convección en los tubos

El coeficiente de convección de los tubos se puede calcular de las siguientes ecuaciones, en función del Reynolds [17]:



Si el Reynolds en el interior de los tubos es menor que 2100,  $h_t$  se puede obtener de la ecuación empírica de Sider-Tate [24]

$$\frac{h_t d_i}{k_t} = 1.86 \left( \text{Re}_t \text{Pr}_t \frac{d_i}{L} \right)^{0.5} \text{Pr}_t^{1/3} \left( \frac{\mu_t}{\mu_w} \right)^{0.14} \quad (4.3.49a)$$

Para valores del Reynolds mayores de 10000, se utiliza la ecuación de Sider-Tate modificada por McAdams [25]

$$\frac{h_t d_i}{k_t} = 0.027 \text{Re}_t^{0.8} \text{Pr}_t^{1/3} \left( \frac{\mu_t}{\mu_w} \right)^{0.14} \quad (4.3.49b)$$

Mientras que para los valores intermedios se puede utilizar la fórmula de Kern [20]

$$\frac{h_t d_i}{k_t} = 0.116 \left[ \text{Re}_t^{2/3} - 125 \right] \left[ 1 + \left( \frac{d_i}{L} \right)^{2/3} \right] \text{Pr}_t^{1/3} \left( \frac{\mu_t}{\mu_w} \right)^{0.14} \quad (4.3.49c)$$

Siendo  $\text{Re}_t$  el valor del número de Reynolds en el interior de los tubos.

$$\text{Re}_t = \rho_t v_t D_t / \mu_t \quad (4.3.50)$$

### 5.3.5.2 Coeficiente de convección en la carcasa

Se obtiene mediante el coeficiente ideal y los factores de corrección, como se ha explicado con anterioridad.

$$h_s = h_{si}(J_c J_f J_b J_r J_s) = h_{si} J_{\text{tot}} \quad (4.3.51)$$

## 5.3.6 Pérdidas de carga

### 5.3.6.1 Pérdida de carga en los tubos

La pérdida de carga en los tubos depende de la velocidad del fluido en su interior, las características del fluido y el factor de fricción de los tubos. Siendo el factor de fricción

$$f_t = K_t \text{Re}_t^{mt} \quad (4.3.52)$$



Los valores de  $K_t$ ,  $m_t$  y  $a_c$  dependen del número de Reynolds, tomando los valores de 16, -1 y 0.35 respectivamente para los Reynolds iguales o inferiores a 2100 y 0.0791, -0.25 y 0.14 respectivamente para Reynolds superiores.

$$\Delta P_t = \frac{2f_t \rho_t v_t^2 L_{tt} (N_{tp}) (N_s)}{D_{ti} (\mu_t / \mu_{tw})^{ac}} + \frac{2.5 \rho_t v_t^2 (N_{tp}) (N_s)}{2} \quad (4.3.53)$$

### 5.3.6.2 Pérdida de carga en la carcasa

La pérdida de carga en la carcasa depende de numerosos factores, y se puede expresar del siguiente modo [26] y [27]

$$\Delta P_s = N_s N_b \Delta P_{wi} R_1 + [(N_b - 1) R_b R_1 + (1 + N_{tcw} / N_{tcc}) R_b R_s] N_s \Delta P_{bi} \quad (4.3.54)$$

Donde  $\Delta P_{bi}$  es la pérdida de carga en el flujo perpendicular de un haz ideal,  $\Delta P_{wi}$  es la pérdida de carga en la ventana del deflector para un haz de tubos ideal equivalente y  $R_1$ ,  $R_b$  y  $R_s$  son los factores de corrección para la pérdida de carga.  $N_{tcw}$  y  $N_{tcc}$  son el número de filas de tubos en la ventana del deflector y el número de filas en flujo perpendicular real en una sección, respectivamente. No se incluyen las pérdidas de carga en las boquillas de entrada y salida, ya que suelen estar incluidas en las especificaciones.

La pérdida de carga en el flujo perpendicular en un haz de tubos ideal,  $\Delta P_{bi}$ , se calcula mediante:

$$\Delta P_{bi} = \frac{2D_s \rho_s}{L_{pp} (\mu_s / \mu_{sw})^{0.14}} \left[ 1 - 2 \left( \frac{B_c}{100} \right) \right] f_{si} (v_s)^2 \quad (4.3.55)$$

Mientras que la pérdida de carga en la ventana del deflector para un haz de tubos ideal,  $\Delta P_{wi}$ , depende del Reynolds del fluido que circula por la carcasa. Si éste es mayor que 100,  $\Delta P_{wi}$  es

$$\Delta P_{wi} = \left[ (1 + 0.3 N_{tcw}) \left( \frac{S_m}{S_w} \right) \rho_s \right] (v_s)^2 \quad (4.3.56)$$



En caso contrario

$$\Delta P_{wi} = 26 \times 10^3 \frac{(v_s)\mu_s}{\sqrt{S_w/S_m}} \left[ \frac{N_{tcw}}{L_{tp} - D_t} + \frac{L_{bc}}{(D_w)^2} \right] + \left( \frac{S_m}{S_w} \right) \rho_s (v_s)^2 \quad (4.3.57)$$

Siendo  $N_{tw}$  el número de tubos en la ventana del deflector,  $S_w$  el área de paso neta en una ventana de deflector,  $S_m$  el área mínima de paso para el flujo perpendicular y  $D_w$  el diámetro hidráulico equivalente para ventana de deflector segmentado.

$$D_w = \frac{4S_w}{\pi d N_{tw} + \pi D_s \theta_{ds} / 2\pi} \quad (4.3.58)$$

### 5.3.7 Precisión del método Bell-Delaware

A pesar de que este método es considerado el mejor en gran parte de la literatura, no es totalmente preciso. Existen diversas comparativas entre el método de Bell-Delaware y métodos como el de análisis de corrientes o el Tinker [28], [29], [30], [26].



## 6. APLICACIÓN DE MATLAB



En este trabajo se pretende dimensionar un intercambiador tubo carcasa mediante el método Bell-Delaware, para obtener el intercambiador de menor coste que cumpla los requerimientos especificados por el usuario y la normativa TEMA.

El programa desarrollado está basado fundamentalmente en los trabajos “*Heat exchanger design targets for minimum area and cost*” de K. Muralikrishna y U.V. Shenoy [31] y “*Feasible design space for Shell-and-tube heat exchangers using the Bell-Delaware method*” de Medardo Serna-González, José M. Ponce-Ortega, Agustín J. Castro-Montoya y Arturo Jiménez-Gutiérrez [32].

## 6.1 CONSIDERACIONES INICIALES

El programa desarrollado es válido para intercambiadores estándar tipo TEMA E, con deflectores de segmentación simple y tubos lisos. Sería posible su modificación, para otro tipo de intercambiador.

Los datos de partida son los caudales máscicos de ambos fluidos, las resistencias de ensuciamiento (fouling), las propiedades físicas de ambos fluidos, así como qué fluido fluye por los tubos y cuál por la carcasa y las temperaturas de entrada y salida de ambos fluidos.

También son necesarios los diámetros interior y exterior de los tubos, la disposición de los tubos y las restricciones pertinentes, incluyendo la máxima pérdida de carga admisible para ambos fluidos.

## 6.2 PROCEDIMIENTO GENERAL

El objetivo principal es la obtención del conjunto de intercambiadores que cumplen las restricciones y requisitos, y a partir de ellos, obtener el de menor coste total anualizado.

El método a seguir para obtener dicho conjunto de intercambiadores es trazar una curva de *pérdida de carga en los tubos vs. pérdida de carga en la carcasa*, para cada una de las restricciones iniciales (*longitud máxima, diámetro de carcasa máximo, relación entre separación de los deflectores y el diámetro de la carcasa máxima y mínima ( $R_{bs}$ ), velocidades por los tubos máxima y mínima y velocidades por la carcasa máxima y mínima*), de todos los intercambiadores que poseen dicha restricción, con el objetivo de delimitar un área, donde se encontrarán los intercambiadores que cumplen todas las restricciones.

Se efectuarán iteraciones para determinar el resto de parámetros geométricos de la carcasa para cada una de las restricciones.



### 6.3 OBTENCIÓN DE LAS CURVAS

Para la obtención del área factible, es necesario trazar 8 curvas: *longitud máxima, diámetro de carcasa máximo, relación entre separación de los deflectores y el diámetro de la carcasa máxima y mínima ( $R_{bs}$ ), velocidades por los tubos máxima y mínima y velocidades por la carcasa máxima y mínima.*

Para un corte del deflector,  $B_c$ , y unos valores de separación de los deflectores a la entrada y salida del intercambiador,  $L_i$  y  $L_o$ , determinados, las ecuaciones anteriormente definidas dependen de cinco variables independientes: pérdida de carga en la carcasa, pérdida de carga en los tubos, diámetro de la carcasa interno, longitud de los tubos y relación entre separación de deflectores y diámetro interno de la carcasa,  $R_{bs}$ . Para obtener dichas variables se dispone de tres ecuaciones, las dos de la pérdida de carga en los tubos y la carcasa, y una única ecuación que relaciona  $L_{ta}$ ,  $D_s$  y  $R_{bs}$ . Por lo tanto se dispone de dos grados de libertad independientes para el diseño.

Dado que un orden cualquiera de resolución no llevaría a un resultado correcto debido a los grados de libertad, para obtener las curvas se seguirá un método de tipo iterativo, obtenido de la publicación de *Muralikrishna y Shenoy* [31].

Restricciones	Paso 1	Paso 2	Paso 3	Paso 4	Paso 5
$V_{t,min}$ $V_{t,max}$	Calcular $D_s$	Elegir $\Delta P_t$ y variarlo	Calcular $L$	Calcular $R_{bs}$	Calcular $\Delta P_s$
$V_{s,min}$ $V_{s,max}$	Elegir $D_s$ y variarlo	Calcular $R_{bs}$	Calcular $L$	Calcular $\Delta P_t$	Calcular $\Delta P_s$
$D_{s,max}$	Elegir $\Delta P_t$ y variarlo	Calcular $L$	Calcular $R_{bs}$	Calcular $\Delta P_s$	
$L_{max}$	Elegir $D_s$ y variarlo	Calcular $\Delta P_t$	Calcular $R_{bs}$	Calcular $\Delta P_s$	
$R_{bs,min}$ $R_{bs,max}$	Elegir $D_s$ y variarlo	Calcular $L$	Calcular $\Delta P_t$	Calcular $\Delta P_s$	

Tabla 11. Proceso a seguir para obtener las curvas de cada restricción.

Se utilizarán las ecuaciones propuestas en el trabajo de *Medardo Serna-González, José M. Ponce-Ortega, Agustín J. Castro-Montoya y Arturo Jiménez-Gutiérrez* [32], con algunas modificaciones debido a erratas.

En las siguientes ecuaciones se tienen en cuenta las unidades a utilizar, siendo las unidades de longitud  $mm$ , las de densidad  $Kg/m^3$ , las de viscosidad  $cP$  y las de presión  $Pa$ .





## DISEÑO BAJO NORMA TEMA DE INTERCAMBIADORES TUBO-CARCASA

La ecuación de la potencia térmica se puede reescribir en los siguientes términos, relacionando  $L_{ta}$ ,  $D_s$  y  $R_{bs}$ .

Para  $Re_t \leq 2100$  (laminar) utilizaremos

$$L_{ta}(D_s - m_1)^n = C_5 \left[ \frac{R_{bs}^{1+a_2} D_s^{1+a_2}}{C_4} + \frac{L_{ta}^{1/3} (D_s - m_1)^{n/3}}{C_6} + C_7 \right] \quad (5.3.1a)$$

con

$$c_h = a_1 \left( \frac{1.33}{L_{tp}/D_t} \right)^a \left( \frac{\rho_s D_t}{\mu_s} \right)^{a_2} \quad (5.3.2)$$

$$K_{S4} = c_h (\mu_s / \mu_{sw})^{0.14} (Pr_s)^{-2/3} \rho_s C_{ps} J_{tot} \quad (5.3.3)$$

$$C_4 = K_{S4} (10^6 M_s / \rho_s)^{1+a_2} [L_{bb} + D_{cti} (L_{tp} - D_t) / L_{tpe}]^{-(1+a_2)} \quad (5.3.4)$$

$$C_5 = \frac{Q(10^6)(m_3 D_t)^n}{\pi D_t (N_s) F(LMTD)} \quad (5.3.5)$$

$$C_6 = \frac{1860 k_t \left( \frac{\mu_t}{\mu_{tw}} \right)^{0.14} \left( \frac{C_{pt} \mu_t}{10^3 k_t} \right)^{1/3} ((4 \times 10^6) M_t)^{1/3} (m_3 D_t)^{n/3}}{(\pi \mu_t)^{1/3}} \quad (5.3.6)$$

$$C_7 = \frac{D_t}{D_{ti}} R_{fi} + \frac{D_t \ln(D_t / D_{ti})}{(2 \times 10^3) k_w} + R_{fs} \quad (5.3.7)$$

Para  $2100 < Re_t \leq 10000$  utilizaremos

$$L_{ta}(D_s - m_1)^n = C_5 \left[ \frac{R_{bs}^{1+a_2} D_s^{1+a_2}}{C_4} + \frac{1}{C_8 (1 + (D_{ti}/L_{ta})^{2/3}) (C_9 / (D_s - m_1)^{2n/3} - 125)} + C_7 \right] \quad (5.3.1b)$$

con



## DISEÑO BAJO NORMA TEMA DE INTERCAMBIADORES TUBO-CARCASA

$$C_8 = \frac{116k_t}{D_t} \left( \frac{\mu_t}{\mu_{tw}} \right)^{0.14} \left( \frac{C_{pt}\mu_t}{10^3 k_t} \right)^{1/3} \quad (5.3.8)$$

$$C_9 = \frac{((4 \times 10^6)M_t)^{2/3} (m_3 D_t)^{2n/3}}{(\pi D_{it} \mu_t)^{2/3}} \quad (5.3.9)$$

Y para  $Re_t > 10000$

$$L_{ta}(D_s - m_1)^n = C_5 \left[ \frac{R_{bs}^{1+a_2} D_s^{1+a_2}}{C_4} + \frac{(D_s - m_1)^{0.8n}}{C_{10}} + C_7 \right] \quad (5.3.1c)$$

con

$$C_{10} = \frac{27 k_t (C_{pt}\mu_t)}{D_t (10^3 k_t)} \left( \frac{\mu_t}{\mu_{tw}} \right)^{0.14} \frac{((4 \times 10^6)M_t)^{0.8} (N_{tp})^{0.8} (m_3 D_t)^{0.8n}}{(\pi D_{it} \mu_t)^{0.8}} \quad (5.3.10)$$

La pérdida de carga en la carcasa se puede reducir a la siguiente ecuación

$$\Delta P_s = C_3 \frac{L_{ta}}{R_{bs}^{3-R_p} D_s^{2-R_p}} \quad (5.3.11)$$

donde  $C_3$  se define como

$$C_3 = \frac{4 K_{S3} (N_s) (M_s)^{2-R_p}}{[\rho_s (10^{-6}) (L_{bb} + D_{ctl} (L_{tp} - D_t) / L_{tpe})]^{2-R_p} \left[ \frac{(N_b + 1)}{(N_b - 1) + (L_i + L_o)} \right]} \quad (5.3.12)$$

$R_p$  y  $K_{S3}$  dependen del Reynolds en la carcasa, siendo para flujo turbulento ( $Re_s \geq 2100$ )

$$R_p = \frac{-b_2}{\frac{K_{S1}}{K_{S2} (v_s^*)^{b_2}} + 1} \quad (5.3.13a)$$



$$K_{S3} = K_{S1}(\nu_s^*)^{R_p} + K_{S2}(\nu_s^*)^{R_p+b_2} \quad (5.3.14a)$$

con

$$K_{S1} = \left( \frac{S_m}{S_w} \right) \frac{(1 + 0.3N_{tcw})R_1 N_b \rho_s}{(N_b + 1)D_s} \quad (5.3.15)$$

$$K_{S2} = \left[ \frac{(N_b - 1)}{(N_b + 1)} R_1 + \frac{(N_{tcc} + N_{tcw})}{N_{tcc}(N_b + 1)} R_s \right] \left[ 1 - 2 \left( \frac{B_c}{100} \right) \right] \frac{2R_b \rho_s c_p}{(\mu_s / \mu_{sw})^{-0.14} L_{pp}} \quad (5.3.16)$$

siendo

$$c_p = b_1 \left( \frac{1.33}{L_{tp}/D_t} \right)^b \left( \frac{\rho_s D_t}{\mu_s} \right)^{b_2} \quad (5.3.17)$$

Mientras que para flujo laminar

$$R_p = 2 - \frac{k'_1 + 2k'_2 \nu_s^* + k'_3(2 + b_2)(\nu_s^*)^{1+b_2}}{k'_1 + k'_2 \nu_s^* + k'_3(\nu_s^*)^{1+b_2}} \quad (5.3.13b)$$

$$K_{S3} = [k'_1(\nu_s^*)^{-1} + k'_2 + k'_3(\nu_s^*)^{b_2}](\nu_s^*)^{R_p} \quad (5.3.14b)$$

con

$$k'_1 = \frac{(26 \times 10^3) N_b R_1 \mu_s}{(N_b + 1) D_s \sqrt{(S_w/S_m)}} \left[ \frac{N_{tcw}}{L_{tp} - D_t} + \frac{L_{bc}}{D_w^2} \right] \quad (5.3.18)$$

$$k'_2 = \frac{N_b R_1 \rho_s}{(N_b + 1) D_s} \left( \frac{S_m}{S_w} \right) \quad (5.3.19)$$

$$k'_3 = \left[ \frac{(N_b - 1)}{(N_b + 1)} R_1 + \frac{(N_{tcc} + N_{tcw})}{N_{tcc}(N_b + 1)} R_s \right] \left[ 1 - 2 \left( \frac{B_c}{100} \right) \right] \frac{2R_b \rho_s c_p}{(\mu_s / \mu_{sw})^{-0.14} L_{pp}} \quad (5.3.20)$$



La pérdida de carga en los tubos es

$$\Delta P_t = C_1 \frac{L_{tt}}{(D_s - m_1)^{n(2+mt)}} + C_2 \frac{1}{(D_s - m_1)^{2n}} \quad (5.3.21)$$

con

$$C_1 = \frac{2K_t(N_{tp})^{3+mt}(N_s)(4 \times 10^6 M_t)^{2+mt}(m_3 D_t)^{n(2+mt)}}{\rho_t \mu_t^{mt} (\mu_t / \mu_{tw})^{ac} \pi^{2+mt} D_{ti}^{5+mt}} \quad (5.3.22)$$

$$C_2 = \frac{1.25(N_{tp})^3(N_s)(4 \times 10^6 M_t)^2(m_3 D_t)^{2n}}{\rho_t \pi^2 D_{ti}^4} \quad (5.3.23)$$

El coeficiente de convección del fluido de la carcasa,  $h_s$ , se obtiene de la siguiente ecuación

$$h_s = C_4 \frac{1}{R_{bs}^{1+a_2} D_s^{1+a_2}} \quad (5.3.24)$$

Pudiendo después obtener el valor de  $v_s$  de

$$h_s = K_{s4}(v_s)^{1+a_2} \quad (5.3.25)$$

#### Procedimiento de cálculo:

Para la obtención de las curvas de la velocidad máxima y mínima en los tubos se procede del modo especificado en la Tabla 11.

En primer lugar, se obtienen los valores de la potencia térmica,  $Q$ , de (4.1.2) y el factor de corrección,  $F$ , de (4.1.18).

Se escoge la velocidad límite por los tubos, ya sea la máxima o la mínima, según la curva que se desee obtener.

A partir de la misma, obtenemos el valor del número de Reynolds,  $Re_t$ , de (4.3.50), el número de tubos,  $N_{tt}$ , de (4.3.11), el diámetro de la carcasa,  $D_s$ , de (4.3.1), el espesor de la placa tubular,  $L_{ts}$ , de (4.3.7), el diámetro del círculo que circunscribe el haz de tubos,  $D_{otl}$ , de (4.3.3) y la holgura entre el haz de tubos y la carcasa,  $L_{bb}$ , de (4.3.6).



Tras ello, se procede a tomar un valor de pérdida de carga en los tubos,  $\Delta P_t$ , que se irá variando a lo largo del proceso para obtener los distintos puntos de la curva. A partir del valor de  $\Delta P_t$ , podemos obtener la longitud de los tubos,  $L_{tt}$ , de (5.3.21) y la longitud efectiva de los tubos,  $L_{ta}$ , de (4.3.8).

#### Bucle de resolución:

Se inicializan las variables necesarias para la ejecución del bucle que se utilizará para obtener la solución,  $R_p$ ,  $C_3$ ,  $C_4$  y  $K_{S4}$ , así como la velocidad del fluido en la carcasa,  $v_s$ . Para realizar la primera iteración, consideraremos que la viscosidad es constante y que los factores de corrección son igual a 1, valores que iremos obteniendo y actualizando con cada iteración.

Se resuelve la ecuación (5.3.1) para obtener  $R_{bs}$ , se obtiene el valor de  $h_s$  de (5.3.24) y de  $v_s$  de (5.3.25).

Se calculan los parámetros geométricos: separación entre los deflectores centrales,  $L_{bc}$ , de (4.3.9), el número de deflectores,  $N_b$ , de (4.3.10), así como el área de paso en flujo perpendicular a los tubos para el fluido de la carcasa,  $S_m$ , de (4.3.21) y el Reynolds del fluido de la carcasa,  $Re_s$ , de (4.3.37).

También se calcularán las distintas áreas de paso debido a holguras, que serán necesarias para obtener los factores de corrección: el área de paso neta en la ventana del deflector se calcula mediante la ecuación (4.3.24), el área entre los deflectores y los tubos debido a las holguras,  $S_{tb}$ , de (4.3.25), el área entre la carcasa y los deflectores,  $S_{sb}$ , de (4.3.26) y el área entre el haz de tubos y la carcasa,  $S_b$ , de (4.3.28).

El siguiente paso es obtener los *factores de corrección*:

El factor de corrección para el flujo por la ventana del deflector,  $J_c$ , de (4.3.38).

Los factores de corrección para las fugas en los deflectores,  $J_l$  y  $R_l$ , de (4.3.39) y (4.3.40), respectivamente.

Los factores de corrección para el flujo entre el haz de tubos y la carcasa,  $J_b$  y  $R_b$ , de (4.3.43) y (4.3.44).

Los factores de corrección para una separación desigual de los deflectores,  $J_s$  y  $R_s$ , de (4.3.45) y (4.3.46).

Y el factor de corrección de flujo laminar,  $J_r$ , de (4.3.48).

Tras ello, se obtienen los valores de las variables  $R_p$  y  $K_{S3}$ , necesarias para calcular el valor de la pérdida de carga en la carcasa, de las ecuaciones (5.3.13) y (5.3.14). Se calculan también los nuevos valores de las variables de iteración  $K_{S4}$  y  $C_4$ .



Se calcula el valor del coeficiente de transferencia de calor en el interior de los tubos,  $h_t$ , mediante (4.3.49), para obtener la temperatura de la pared de los tubos,  $T_w$ , de (4.3.30), y así calcular los valores de las viscosidades a la temperatura de la pared,  $\mu_{tw}$  y  $\mu_{sw}$  (4.3.31).

Vuelve a ejecutarse el bucle completo, hasta que las variables de iteración ( $C_4$ ,  $K_{s4}$ ,  $v_s$ ,  $R_p$  y  $C_3$ ) convergen.

A continuación, se calcula el valor de la pérdida de carga en la carcasa, mediante (5.3.11) y se modifica el valor inicial de la pérdida de carga en los tubos, para volver a ejecutar los mismos pasos y hallar el siguiente punto de la gráfica.

Para obtener el resto de las curvas, se prosigue de un modo similar, según el proceso especificado en la Tabla 11.

#### 6.4 EL PROBLEMA DE MURALIKRISHNA Y SHENOY

A modo de comparativa se resolverá el problema resuelto por *Muralikrishna* y *Shenoy* en su publicación, que parte de los siguientes datos iniciales:

*6 pasos por tubo, 1 por carcasa. Intercambiador tipo TEMA E de cabezal de anillos divididos.*

*Diámetro exterior de los tubos ( $D_t$ ) 19.1mm, diámetro interior ( $D_{ti}$ ) 15.4mm y conductividad térmica  $k_w=36 \text{ W/m}\cdot^\circ\text{C}$  (acero). Layout cuadrado y distancia entre tubos 25.4mm.*

*Los deflectores son segmentados, con un corte del deflector de 25%. La pérdida de carga admisible en los tubos es de 69kPa y en la carcasa de 14kPa. La suma del factor de ensuciamiento (fouling) en los tubos ( $R_{ft}$ ) y la carcasa ( $R_{fs}$ ) es de  $3 \times 10^{-4} \text{ m}^2\cdot^\circ\text{C/W}$ .*

*La velocidad máxima en los tubos ( $v_{t,max}$ ) es de 2.2m/s y la mínima ( $v_{t,min}$ ) de 1.5m/s, mientras que en la carcasa ( $v_{s,max}$ ,  $v_{s,min}$ ) son de 0.8m/s y 0.3m/s.*

*El diámetro máximo de la carcasa ( $D_{s,max}$ ) es de 1m, y la longitud máxima ( $L_{max}$ ) de 1.2m, mientras que la relación entre la separación de los deflectores y el diámetro de la carcasa ( $R_{bs,min}$ ,  $R_{bs,max}$ ) puede oscilar entre 0.2 y 1.*

DISEÑO BAJO NORMA TEMA DE INTERCAMBIADORES TUBO-CARCASA

---

Las propiedades de los fluidos son:

Para el fluido de los *tubos*:

$T_{ti}$  (temperatura de entrada en la carcasa): 15°C

$T_{to}$  (temperatura de entrada en la carcasa): 25°C

$M_t$  (flujo másico en los tubos): 31.58 kg/s

$C_{pt}$  (calor específico del fluido de los tubos): 4180J/kg·K

$\rho_t$  (densidad): 998kg/m<sup>3</sup>

$\mu_t$  (viscosidad): 1cP = 10<sup>-3</sup> kg/m·s

$k_t$  (conductividad térmica): 0.6W/m·K

Para el fluido de la carcasa:

$T_{si}$  (temperatura de entrada en la carcasa): 98°C

$T_{so}$  (temperatura de salida de la carcasa): 65°C

$M_s$  (flujo másico en la carcasa): 14.9 kg/s

$C_{ps}$  (calor específico del fluido de los tubos): 2684J/kg·K

$\rho_s$  (densidad): 777kg/m<sup>3</sup>

$\mu_s$  (viscosidad): 0.23cP = 0.23\*10<sup>-3</sup> kg/ms

$k_s$  (conductividad térmica): 0.11W/m·K

### 6.4.1 Área factible

Es necesario trazar las curvas para cada una de las variables para obtener el área factible.

#### 6.4.1.1 Curvas velocidad

Trazando las curvas de velocidad máxima y mínima tanto en los tubos como en la carcasa queda delimitado el siguiente espacio:

La línea de puntos verde es la velocidad mínima en los tubos. Delimita el espacio por la izquierda, teniendo todos los puntos que se encuentran a su izquierda una velocidad en los tubos inferior. Del mismo modo, la línea continua azul de velocidad máxima en los tubos, delimita el espacio por la derecha, ya que todos los puntos a su derecha tienen una velocidad en el interior de los tubos superior.

La línea de puntos roja es la velocidad máxima en la carcasa, y delimita el espacio por la parte superior, teniendo todos los puntos que se encuentren por encima una velocidad del fluido de la carcasa superior a la máxima. Del mismo modo, la línea continua azul claro delimita el espacio por la parte inferior, teniendo todos los puntos que están por debajo una velocidad en la carcasa inferior a la mínima.

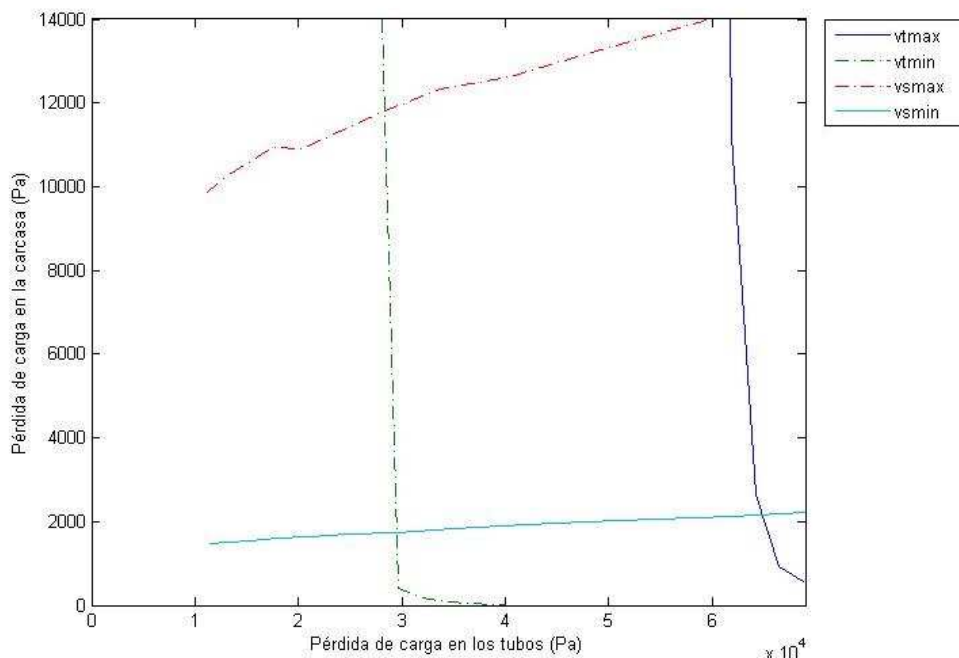


Figura 65. Curvas de velocidades límite.



#### 6.4.1.2 Curvas diámetro de carcasa máximo y longitud máxima

Representando las curvas de diámetro de la carcasa máximo y longitud máxima queda delimitado el siguiente espacio, en el que la curva de longitud máxima delimita el espacio por la derecha, y la de diámetro máximo por la izquierda.

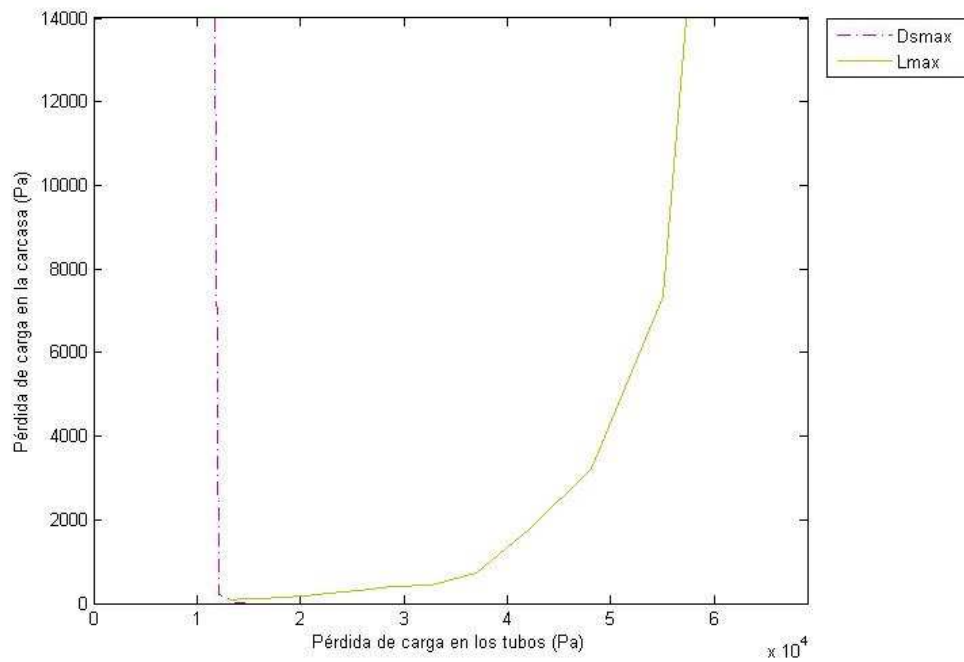


Figura 66. Curvas de diámetro máximo y longitud máxima de la carcasa.

#### 6.4.1.3 *Curvas relación entre separación de los deflectores y diámetro de la carcasa, $R_{bs}$ , máxima y mínima*

Por último las curvas de la relación de separación de los deflectores con el diámetro de la carcasa, en la que el máximo es 1, que delimita el espacio por su parte inferior, y el mínimo es 0.2, que delimita el espacio por la parte de arriba.

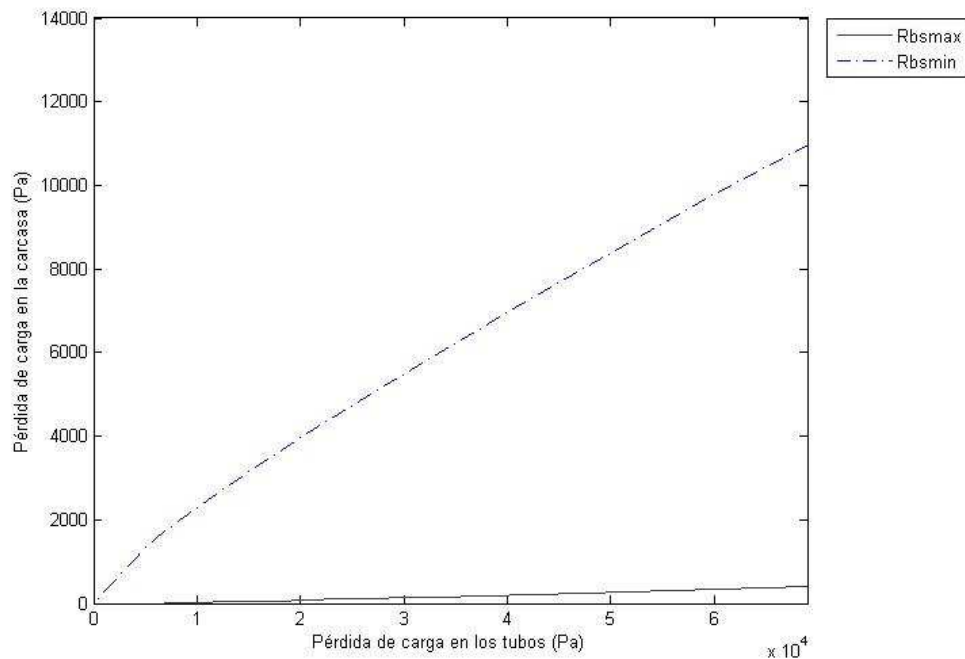


Figura 67. Curva de relación entre separación de los deflectores y diámetro de la carcasa máxima y mínima.

#### 6.4.1.4 Área obtenida

Representando todas las curvas a la vez podemos obtener el área factible, que cumple todas las restricciones y aparece sombreada en la siguiente figura.

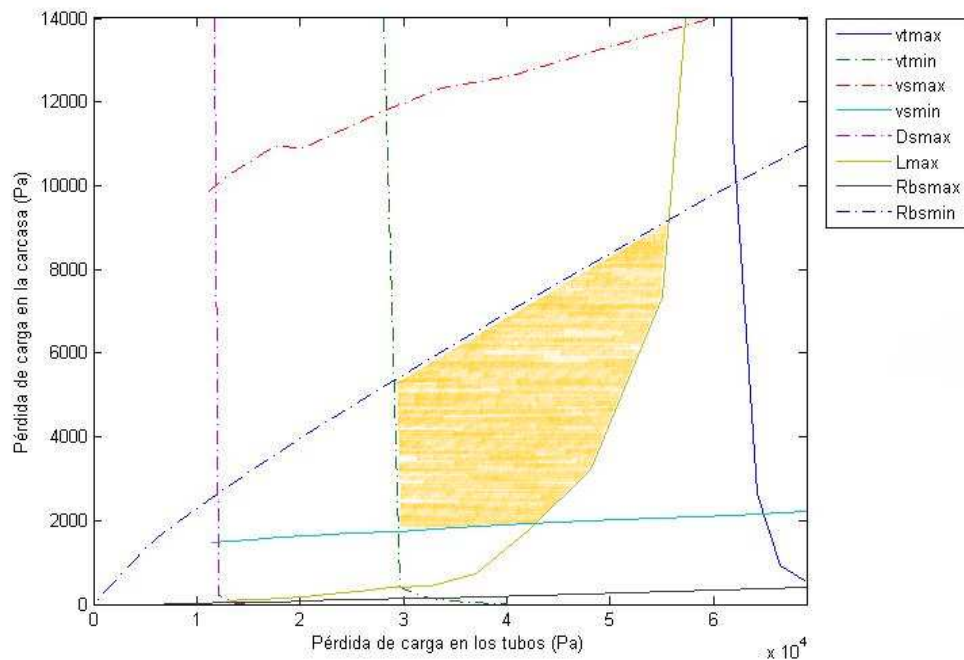


Figura 68. Área factible obtenida.

Siendo la gráfica obtenida por *Muralikrishna y Shenoy*:

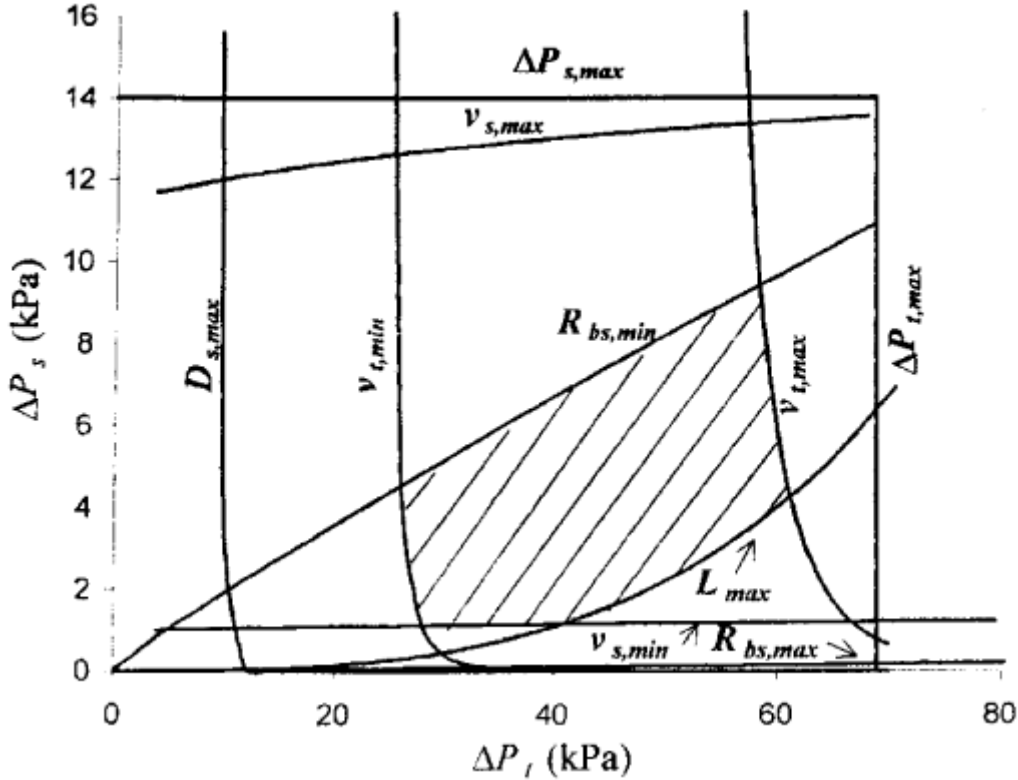


Figura 69. Área factible obtenida por *Muralikrishna y Shenoy*.

Las diferencias que se aprecian pueden ser debidas a los factores de corrección, ya que en el trabajo de *Muralikrishna y Shenoy* utilizan una constante para tenerlos en cuenta, en lugar de valores dependientes de la geometría.

#### 6.4.2 Coste del intercambiador

La expresión utilizada para calcular el coste del intercambiador viene de la publicación de *Jegade, F.O. y Polley, G.T.* [33]. Es la utilizada en el trabajo de *Muralikrishna y Shenoy*.

Se utilizará el coste total anualizado (TAC). Tiene en cuenta los costes de fabricación y los de operación, considerando el coste de adquisición del intercambiador y las dos bombas para los fluidos, así como el consumo de dichas bombas durante el funcionamiento.

$$TAC = A_f \left\{ C_a + C_b A^c + C_e + C_f \left[ \frac{M_s \Delta P_s}{\rho_s} \right]^g + C_e + C_f \left[ \frac{M_t \Delta P_t}{\rho_t} \right]^g \right\} + \frac{C_{pow} H}{\eta} \left[ \frac{M_s \Delta P_s}{\rho_s} + \frac{M_t \Delta P_t}{\rho_t} \right]$$

Siendo cada uno de los términos:



## DISEÑO BAJO NORMA TEMA DE INTERCAMBIADORES TUBO-CARCASA

$A_f$ : factor de anualización del coste inicial

$C_a$  y  $C_b$ : constantes para el cálculo del coste de adquisición del intercambiador

$A$ : área de intercambiador de calor

$c$ : constante exponencial para el coste de adquisición del intercambiador

$C_e$  y  $C_f$ : constantes para el cálculo del coste de adquisición de las bombas

$g$ : constante exponencial para el coste de adquisición de las bombas

$C_{\text{pow}}$ : coste energético

$H$ : tiempo de funcionamiento anual

$\eta$ : rendimiento de las bombas

Viniendo determinados sus valores en la siguiente tabla:

$C_a$ [\$]	30 000
$C_b$ [\$/ $(\text{m}^2)^{0.81}$ ]	750
$c$	0.81
$C_e$ [\$]	2 000
$C_f$ [\$/ $\text{W}^{0.68}$ ]	5
$g$	0.68
$C_{\text{pow}}$ [\$/W h]	0.000 05
$H$ [h/yr]	8 000
$A_f$ [1/yr]	0.322
$\eta$	0.7

Tabla 12. Constantes para el cálculo del coste total anualizado de un intercambiador tubo-carcasa.

#### 6.4.2.1 Curvas de isocoste total anualizado (TAC)

Se pueden representar las curvas de isocoste, para ver de qué modo varía el coste total del intercambiador en función de las dimensiones del intercambiador y las pérdidas de carga.

Para el problema en cuestión, obtenemos:

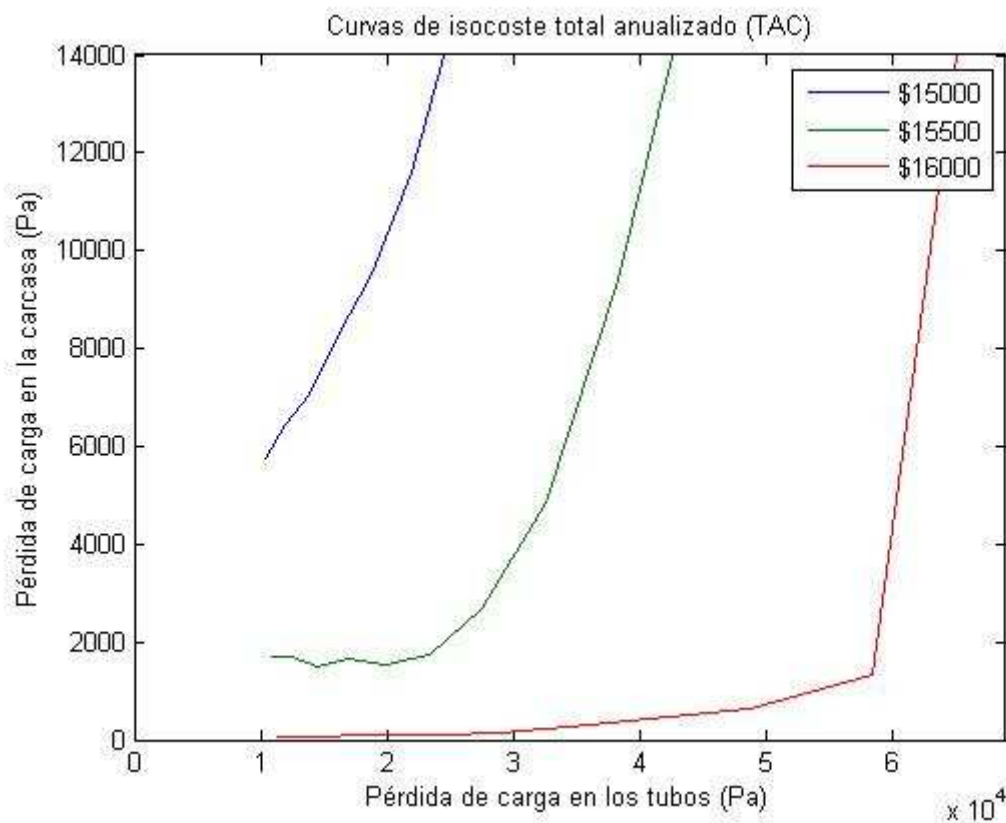


Figura 70. Curvas de isocoste total anualizado del intercambiador.

Por lo tanto combinando esta gráfica con la del área factible, se puede extrapolar el punto de mínimo coste.

## DISEÑO BAJO NORMA TEMA DE INTERCAMBIADORES TUBO-CARCASA

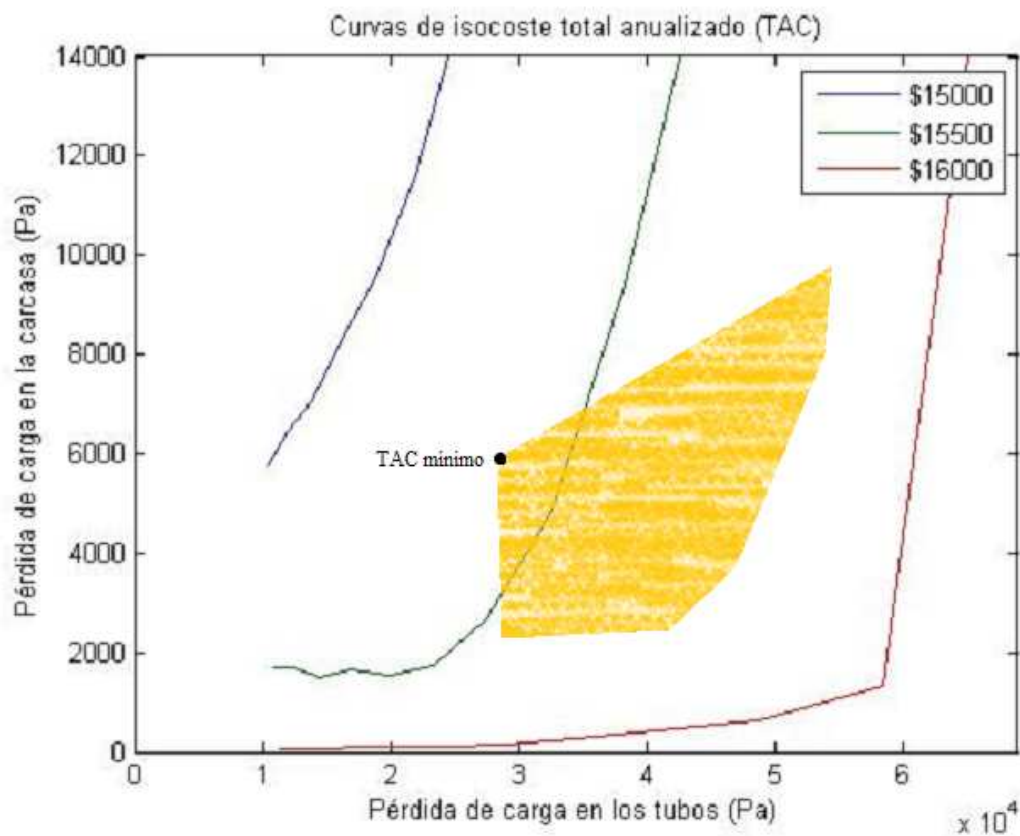


Figura 71. Coste total anualizado mínimo para las restricciones de partida.

En nuestro caso, el punto de mínimo TAC es el de la intersección entre  $R_{bsmin}$  y  $v_{tmin}$  ya que será el punto tangente a la curva de menor coste. Que corresponde al siguiente intercambiador:

Pérdida de carga en los tubos [Pa]	Velocidad en los tubos [m/s]
27933.24	1.50
Pérdida de carga en la carcasa [Pa]	Relación entre separación de los deflectores y diámetro de la carcasa
5202.43	0.20
Diámetro de la carcasa [mm]	Coste total anualizado [\$]
853.90	15990.70
Longitud del intercambiador [mm]	Área de intercambio [m <sup>2</sup> ]
1018.65	34.80
Velocidad en la carcasa [m/s]	
0.52	

Figura 72. Características del intercambiador de menor coste total anualizado (TAC) obtenido en este trabajo.



### 6.4.3 Comparativa de resultados obtenidos

Tras el cálculo del intercambiador de mínimo coste con nuestro programa, podemos comparar los resultados con otros trabajos similares y con algunos software de cálculo de intercambiadores.

*Muralikrishna y Shenoy* en su trabajo obtienen el siguiente intercambiador de mínimo coste:

$\Delta P_t$ [kPa]	25.93
$\Delta P_s$ [kPa]	4.5
$D_s$ [mm]	855
$L$ [mm]	844
$R_{bs}$	0.2
$A$ [m <sup>2</sup> ]	34.41
TAC [\$ /year]	15 895

*Figura 73. Características del intercambiador de menor coste total anualizado (TAC) obtenido por Muralikrishna y Shenoy [31].*

Y los autores de “*Feasible design space for Shell-and-tube heat exchangers using the Bell-Delaware method*” [32]:

$\Delta P_t$ [kPa]	34.736
$\Delta P_s$ [kPa]	1.514
$D_s$ [mm]	662.61
$L$ [mm]	1 067.47
$R_{bs}$	0.239
$A$ [m <sup>2</sup> ]	19.96
TAC [\$ /year]	14 525

*Figura 74. Características del intercambiador de menor coste total anualizado (TAC) obtenido por los autores de “Feasible design space for Shell-and-tube heat exchangers using the Bell-Delaware method” [32]*

Mediante la resolución del mismo problema con los software de cálculo HTFS y B-JAC se obtienen los siguientes resultados.





## DISEÑO BAJO NORMA TEMA DE INTERCAMBIADORES TUBO-CARCASA

	$L_{\max} = 1.2 \text{ m}, N_{\text{pass}} = 6$	
	HTFS	B-JAC
$\Delta P_t$ [kPa]	50.39	33.892
$\Delta P_s$ [kPa]	3.49	2.029
$D_s$ [mm]	686	880
$L$ [mm]	1 056	1 200
$R_{bs}$	0.24	0.486
$A$ [m <sup>2</sup> ]	29.84	56.6
TAC [\$/year]	15 948	18 227

Figura 75. Características del intercambiador de menor coste total anualizado (TAC) obtenido por los software de cálculo HTFS y B-JAC.

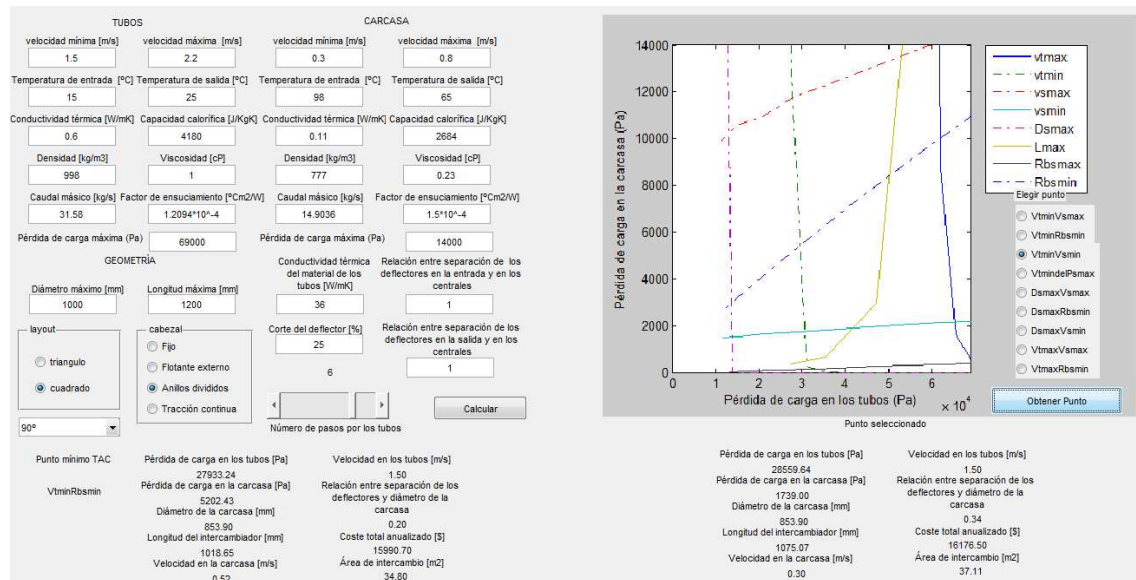
Se aprecian diferencias significativas entre los software HTFS y B-JAC y esta aplicación, así como entre ambos software, tanto en el coste total anualizado, como en las dimensiones del intercambiador. Por lo tanto, parece razonable que existan ciertas discrepancias entre los resultados obtenidos por este programa, y los obtenidos mediante dichos software.

Los resultados obtenidos mediante el software HTFS se asemejan más a los obtenidos mediante esta aplicación.

## DISEÑO BAJO NORMA TEMA DE INTERCAMBIADORES TUBO-CARCASA

## 6.4.4 Interfaz

La interfaz de la aplicación, permite introducir las restricciones y propiedades de los fluidos de manera intuitiva y accesible, así como visualizar los resultados obtenidos e interactuar con ellos.



## DISEÑO BAJO NORMA TEMA DE INTERCAMBIADORES TUBO-CARCASA

Se pueden diferenciar varias secciones:

#### 6.4.4.1 Introducción de datos

Consta de un conjunto de espacios en blanco y selectores que permiten variar tanto las características de los fluidos (densidades, viscosidades, flujos máscos...), como la geometría del intercambiador (pasos por los tubos, diámetro máximo de la carcasa, longitud máxima de la carcasa, separación entre deflectores...). Existiendo un apartado para el fluido de los tubos, otro para el de la carcasa y un último apartado para la geometría del intercambiador.

TUBOS				CARCASA			
velocidad mínima [m/s]	velocidad máxima [m/s]	velocidad mínima [m/s]	velocidad máxima [m/s]				
1.5	2.2	0.3	0.8				
Temperatura de entrada [°C]	Temperatura de salida [°C]	Temperatura de entrada [°C]	Temperatura de salida [°C]				
15	25	98	65				
Viscosidad a Tin [cP]	Viscosidad a Tout [cP]	Viscosidad a Tin [cP]	Viscosidad a Tout [cP]				
1	1	0.23	0.23				
Densidad [kg/m3]	Conductividad térmica [W/mK]	Densidad [kg/m3]	Conductividad térmica [W/mK]				
998	0.6	777	0.11				
Caudal másico [kg/s]	Factor de ensuciamiento [°Cm2/W]	Caudal másico [kg/s]	Factor de ensuciamiento [°Cm2/W]				
31.58	$1.2094 \cdot 10^{-4}$	14.9036	$1.5 \cdot 10^{-4}$				
Pérdida de carga máxima (Pa)	Capacidad calorífica [J/KgK]	Pérdida de carga máxima (Pa)	Capacidad calorífica [J/KgK]				
69000	4180	14000	2684				
GEOMETRÍA							
Diámetro máximo [mm]	Longitud máxima [mm]	Conductividad térmica del material de los tubos [W/mK]	Relación entre separación de los deflectores en la entrada y en los centrales				
1000	1200	36	1				
layout	cabezal	Corte del deflector [%]	Relación entre separación de los deflectores en la salida y en los centrales				
<input type="radio"/> triangulo <input checked="" type="radio"/> cuadrado	<input type="radio"/> Fijo <input type="radio"/> Flotante externo <input checked="" type="radio"/> Anillos divididos <input type="radio"/> Tracción continua	25	1				
90°		6					
		Número de pasos por los tubos					
				Calcular			

Figura 77. Panel para introducir datos en el programa.



#### 6.4.4.2 Punto óptimo

Tras introducir los datos y pulsar el botón “Calcular” se ejecuta el programa y se obtiene el punto de diseño óptimo, de coste total anualizado (TAC) mínimo, para el que se representan las dimensiones del intercambiador y sus propiedades.

Punto mínimo TAC	Pérdida de carga en los tubos [Pa]	Velocidad en los tubos [m/s]
	27933.23	1.50
$V_{tmin}R_{bsmin}$	Pérdida de carga en la carcasa [Pa]	Relación entre separación de los deflectores y diámetro de la carcasa
	5202.45	
	Diámetro de la carcasa [mm]	
	853.90	0.20
	Longitud del intercambiador [mm]	Coste total anualizado [€]
	1018.65	12818.14
	Velocidad en la carcasa [m/s]	Área de intercambio [m <sup>2</sup> ]
	0.52	34.80

Figura 78. Presentación de las características del intercambiador de mínimo coste obtenido mediante el programa.

En este caso corresponde con la intersección de las curvas de velocidad mínima en los tubos ( $V_{tmin}$ ) y relación de separación entre los deflectores y diámetro de la carcasa mínima ( $R_{bs,min}$ ).

#### 6.4.4.3 Gráfica pérdida de carga en los tubos vs. pérdida de carga en la carcasa

Obteniendo para dichos datos la gráfica de *pérdida de carga en los tubos vs. pérdida de carga en la carcasa*, que permite representar el área factible.

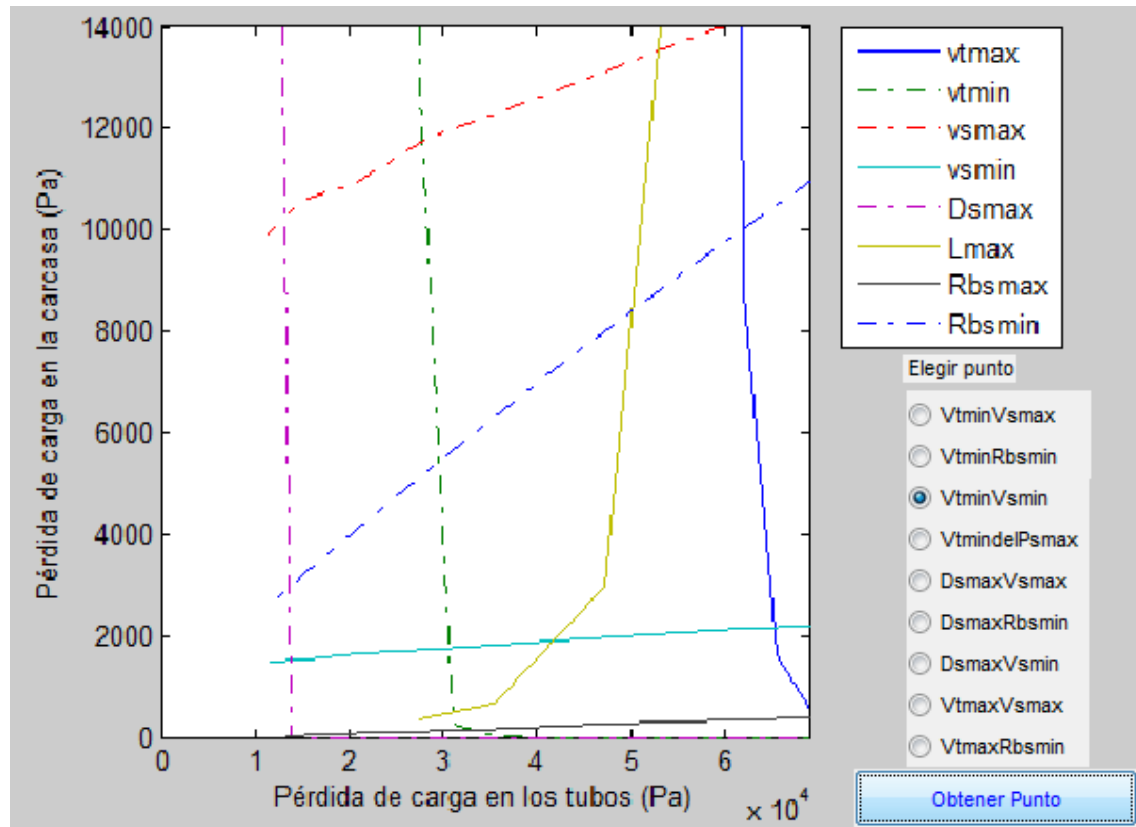


Figura 79. Gráfica de "pérdida de carga en los tubos vs. pérdida de carga en la carcasa" para todas las restricciones obtenida mediante el programa.



## DISEÑO BAJO NORMA TEMA DE INTERCAMBIADORES TUBO-CARCASA

## 6.4.4.4 Cálculo analítico de puntos

A partir del panel situado junto a la gráfica, se pueden obtener analíticamente los valores de los puntos más significativos de la gráfica.

Pérdida de carga en los tubos [Pa]	Velocidad en los tubos [m/s]
28559.64	1.50
Pérdida de carga en la carcasa [Pa]	Relación entre separación de los deflectores y diámetro de la carcasa
1739.00	0.34
Diámetro de la carcasa [mm]	Coste total anualizado [€]
853.90	12967.08
Longitud del intercambiador [mm]	Área de intercambio [m <sup>2</sup> ]
1075.07	37.11
Velocidad en la carcasa [m/s]	
0.30	

Figura 80. Presentación de las características del intercambiador del punto de la gráfica seleccionado.



## 7. ANÁLISIS



Gracias a la aplicación podemos estudiar la influencia de diversos parámetros en el diseño del intercambiador.

## 7.1 ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL *FOULING*

En este caso analizaremos la influencia del ensuciamiento o fouling en el coste del intercambiador, y en el *área factible*. Resolveremos para ello el mismo problema que en el caso anterior, para poder comparar resultados con mayor facilidad.

### 7.1.1 Incremento del fouling

Un aumento del fouling de un 25%, conduce a los siguientes resultados:

Factor de ensuciamiento [ $^{\circ}\text{Cm}^2/\text{W}$ ]		Factor de ensuciamiento [ $^{\circ}\text{Cm}^2/\text{W}$ ]
1.5013e-04		1.8750e-04
Punto mínimo TAC	Pérdida de carga en los tubos [Pa]	Velocidad en los tubos [m/s]
VtminRbsmin	28366.51	1.50
	Pérdida de carga en la carcasa [Pa]	Relación entre separación de los deflectores y diámetro de la carcasa
	5402.19	0.20
	Diámetro de la carcasa [mm]	Coste total anualizado [€]
	853.90	12955.70
	Longitud del intercambiador [mm]	Área de intercambio [m <sup>2</sup> ]
	1057.67	36.40
	Velocidad en la carcasa [m/s]	
	0.52	

Figura 81. Intercambiador de mínimo coste obtenido con un aumento del fouling de un 25%.

Se aprecia un aumento del coste total anualizado (TAC), que en el caso inicial era de 12,818.14€ y tras aumentar el fouling, de 12,955.70€. Lo que supone un aumento del coste de en torno a un 1%.

A su vez, se produce un aumento en la longitud del intercambiador requerida, siendo la inicial de 1018.65mm, y tras aumentar el fouling es de 1057.67mm. Lo que supone un aumento de casi un 4%, que conlleva un aumento de la misma proporción en el área de intercambio.



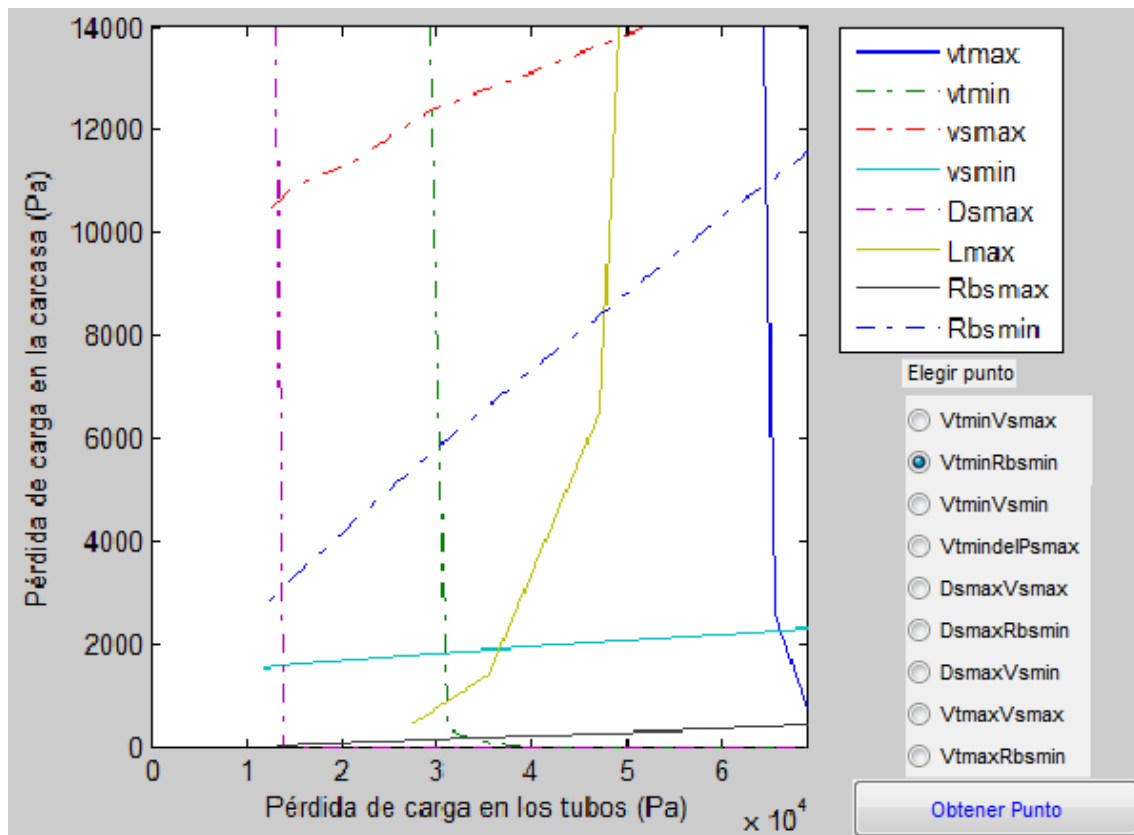


Figura 82. Gráfica de “pérdida de carga en los tubos vs. pérdida de carga en la carcasa” para todas las restricciones con un aumento del fouling de un 25%.

### 7.1.2 Disminución del fouling

Una disminución del fouling de un 25%, conduce a los siguientes resultados:

Factor de ensuciamiento [ $^{\circ}\text{Cm}^2/\text{W}$ ]		Factor de ensuciamiento [ $^{\circ}\text{Cm}^2/\text{W}$ ]
9.0075e-05		1.1250e-04
Punto mínimo TAC	Pérdida de carga en los tubos [Pa]	Velocidad en los tubos [m/s]
$V_{tmin}R_{bsmin}$	27487.71	1.50
	Pérdida de carga en la carcasa [Pa]	Relación entre separación de los deflectores y diámetro de la carcasa
	4997.03	0.20
	Diámetro de la carcasa [mm]	Coste total anualizado [€]
	853.90	12675.52
	Longitud del intercambiador [mm]	Área de intercambio [m <sup>2</sup> ]
	978.53	33.15
	Velocidad en la carcasa [m/s]	
	0.52	

Figura 83. Intercambiador de mínimo coste obtenido con una disminución del fouling de un 25%.

## DISEÑO BAJO NORMA TEMA DE INTERCAMBIADORES TUBO-CARCASA

Se aprecia una disminución del coste total anualizado (TAC), que en el caso inicial era de 12,818.14€ y tras disminuir el fouling, de 12,675.52€. Lo que supone una reducción del coste de en torno a un 1%. Como era de esperar, se produce una disminución de la longitud del intercambiador requerida, quedando en 978.53mm. Lo que supone una reducción de más de un 4%.

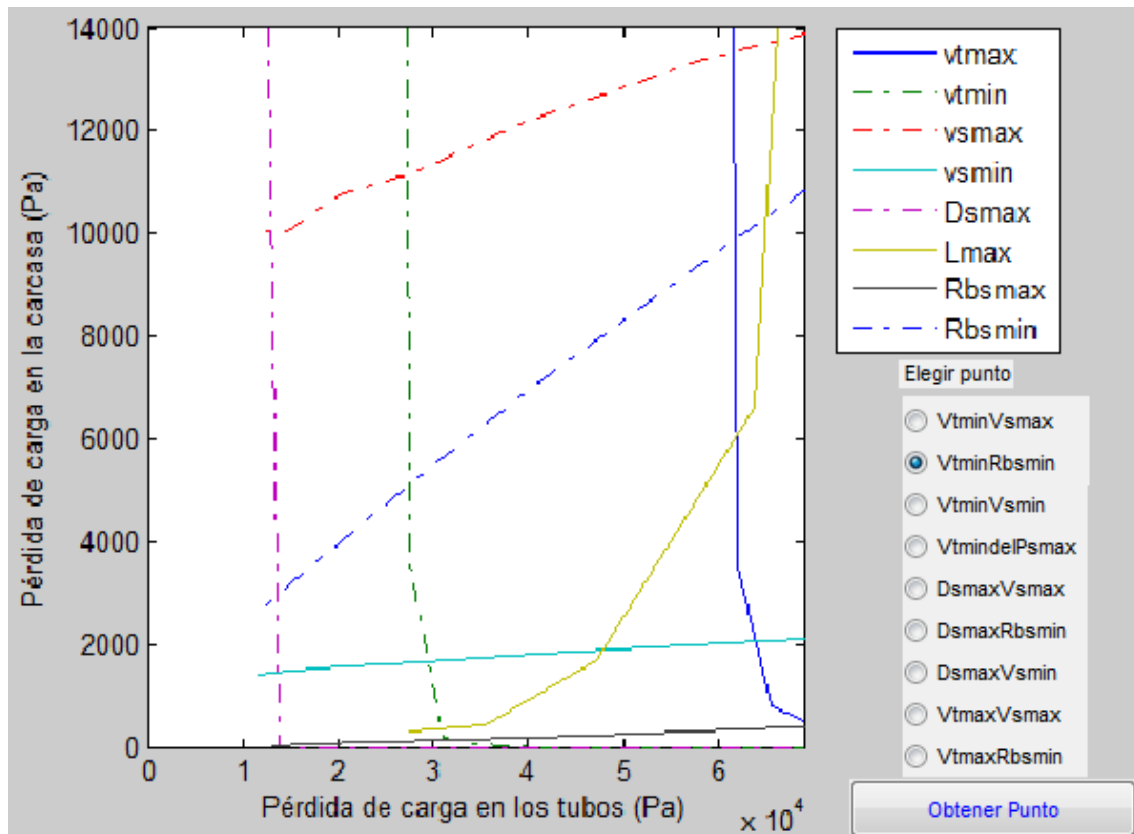


Figura 84. Gráfica de "pérdida de carga en los tubos vs. pérdida de carga en la carcasa" para todas las restricciones con una disminución del fouling de un 25%.



# ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

## ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```

1 function varargout = menu(varargin)
2 % MENU MATLAB code for menu.fig
3 % Begin initialization code - DO NOT EDIT
4 gui_Singleton = 1;
5 gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
6                   'gui_Singleton',   gui_Singleton, ...
7                   'gui_OpeningFcn', @menu_OpeningFcn, ...
8                   'gui_OutputFcn',  @menu_OutputFcn, ...
9                   'gui_LayoutFcn',  [], ...
10                  'gui_Callback',    []);
11 if nargin && ischar(varargin{1})
12     gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
13 end
14
15 if nargout
16     [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
17 else
18     gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
19 end
20 %Creación de todas las variables en GUI y aviso de si los valores
21 %introducidos son válidos, en caso de no serlo, se sustituye el valor de la
22 %casilla por 0.
23 function menu_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin) %#ok<*INUSL>
24 handles.output = hObject;
25 guidata(hObject, handles);
26 function varargout = menu_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
27 varargout{1} = handles.output;
28 function vtmin_Callback(hObject, eventdata, handles) %#ok<*DEFNU>
29 if isempty(str2num(get(handles.vtmin, 'String'))) || str2num(get(handles.
vtmin, 'String')) <= 0 %#ok<*ST2NM>
30     set(handles.vtmin, 'String', '0');
31     warndlg('Debe ser un número positivo')
32 end
33 function vtmin_CreateFcn(hObject, eventdata, handles) %#ok<*INUSD>
34 if ispc && isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'), get(
(0, 'defaultUiControlBackgroundColor'))
35     set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
36 end
37 function vtmax_Callback(hObject, eventdata, handles)
38 if isempty(str2num(get(handles.vtmax, 'String'))) || str2num(get(handles.
vtmax, 'String'))
39     set(handles.vtmax, 'String', '0');
40     warndlg('Debe ser un número positivo')
41 else if str2num(get(handles.vtmax, 'String')) < str2num(get(handles.vtmin, 'String'))
42     set(handles.vtmax, 'String', get(handles.vtmin, 'string'));
43     warndlg('vtmax debe ser mayor o igual que vtmin')
44     end
45 end
46 function vtmax_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
47 if ispc && isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'), get(
(0, 'defaultUiControlBackgroundColor'))
48     set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
49 end

```

## ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```

50 function vsmin_Callback(hObject, eventdata, handles)
51 if isempty(str2num(get(handles.vsmín,'String')) || str2num(get(handles.↵
vsmín,'String'))<=0
52     set(handles.vsmín,'String','0');
53     warndlg('Debe ser un número positivo')
54 end
55 function vsmin_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
56 if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(↵
(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
57     set(hObject,'BackgroundColor','white');
58 end
59 function vsmax_Callback(hObject, eventdata, handles)
60 if isempty(str2num(get(handles.vsmáx,'String')) || str2num(get(handles.↵
vsmáx,'String'))<=0
61     set(handles.vsmáx,'String','0');
62     warndlg('Debe ser un número positivo')
63 else if str2num(get(handles.vsmáx,'String'))<str2num(get(handles.vsmín,'String'))
64     set(handles.vsmáx,'String',get(handles.vsmín,'string'));
65     warndlg('vsmáx debe ser mayor o igual que vsmín')
66 end
67 end
68 function vsmax_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
69 if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(↵
(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
70     set(hObject,'BackgroundColor','white');
71 end
72 function Ttin_Callback(hObject, eventdata, handles)
73 if isempty(str2num(get(handles.Ttin,'String')) || str2num(get(handles.↵
Ttin,'String'))<=0
74     set(handles.Ttin,'String','0');
75     warndlg('Debe ser un número positivo')
76 end
77 function Ttin_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
78 if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(↵
(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
79     set(hObject,'BackgroundColor','white');
80 end
81 function Ttout_Callback(hObject, eventdata, handles)
82 if isempty(str2num(get(handles.Ttout,'String')) || str2num(get(handles.↵
Ttout,'String'))<=0
83     set(handles.Ttout,'String','0');
84     warndlg('Debe ser un número positivo')
85 end
86 function Ttout_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
87 if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(↵
(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
88     set(hObject,'BackgroundColor','white');
89 end
90 function Tsin_Callback(hObject, eventdata, handles)
91 if isempty(str2num(get(handles.Tsin,'String')) || str2num(get(handles.↵
Tsin,'String'))<=0
92     set(handles.Tsin,'String','0');
93     warndlg('Debe ser un número positivo')

```

## ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```

94 end
95 function Tsin_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
96 if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(
(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
97     set(hObject,'BackgroundColor','white');
98 end
99 function Tsout_Callback(hObject, eventdata, handles)
100 if isempty(str2num(get(handles.Tsout,'String')) || str2num(get(handles.
Tsout,'String'))<=0
101     set(handles.Tsout,'String','0');
102     warndlg('Debe ser un número positivo')
103 end
104 function Tsout_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
105 if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(
(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
106     set(hObject,'BackgroundColor','white');
107 end
108 function kt_Callback(hObject, eventdata, handles)
109 if isempty(str2num(get(handles.kt,'String')) || str2num(get(handles.kt,'String'))<=0
110     set(handles.kt,'String','0');
111     warndlg('Debe ser un número positivo')
112 end
113 function kt_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
114 if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(
(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
115     set(hObject,'BackgroundColor','white');
116 end
117 function Cpt_Callback(hObject, eventdata, handles)
118 if isempty(str2num(get(handles.Cpt,'String')) || str2num(get(handles.
Cpt,'String'))<=0
119     set(handles.Cpt,'String','0');
120     warndlg('Debe ser un número positivo')
121 end
122 function Cpt_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
123 if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(
(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
124     set(hObject,'BackgroundColor','white');
125 end
126 function ROt_Callback(hObject, eventdata, handles)
127 if isempty(str2num(get(handles.ROt,'String')) || str2num(get(handles.
ROt,'String'))<=0
128     set(handles.ROt,'String','0');
129     warndlg('Debe ser un número positivo')
130 end
131 function ROt_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
132 if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(
(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
133     set(hObject,'BackgroundColor','white');
134 end
135 function MUtin_Callback(hObject, eventdata, handles)
136 if isempty(str2num(get(handles.MUtin,'String')) || str2num(get(handles.
MUtin,'String'))<=0

```

## ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```

137     set(handles.MUtin,'String','0');
138     warndlg('Debe ser un número positivo')
139 end
140 function MUTin_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
141 if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(
(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
142     set(hObject,'BackgroundColor','white');
143 end
144 function MUTout_Callback(hObject, eventdata, handles)
145 if isempty(str2num(get(handles.MUout,'String')) || str2num(get(handles.
MUTout,'String'))<=0
146     set(handles.MUout,'String','0');
147     warndlg('Debe ser un número positivo')
148 end
149 function MUTout_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
150 if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(
(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
151     set(hObject,'BackgroundColor','white');
152 end
153 function ks_Callback(hObject, eventdata, handles)
154 if isempty(str2num(get(handles.ks,'String')) || str2num(get(handles.ks,'String'))<=0
155     set(handles.ks,'String','0');
156     warndlg('Debe ser un número positivo')
157 end
158 function ks_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
159 if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(
(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
160     set(hObject,'BackgroundColor','white');
161 end
162 function Cps_Callback(hObject, eventdata, handles)
163 if isempty(str2num(get(handles.Cps,'String')) || str2num(get(handles.
Cps,'String'))<=0
164     set(handles.Cps,'String','0');
165     warndlg('Debe ser un número positivo')
166 end
167 function Cps_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
168 if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(
(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
169     set(hObject,'BackgroundColor','white');
170 end
171 function ROs_Callback(hObject, eventdata, handles)
172 if isempty(str2num(get(handles.ROs,'String')) || str2num(get(handles.
ROs,'String'))<=0
173     set(handles.ROs,'String','0');
174     warndlg('Debe ser un número positivo')
175 end
176 function ROs_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
177 if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(
(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
178     set(hObject,'BackgroundColor','white');
179 end
180 function MUsin_Callback(hObject, eventdata, handles)

```

## ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```

181 if isempty(str2num(get(handles.MUin,'String')) || str2num(get(handles.
MUin,'String'))<=0
182     set(handles.MUin,'String','0');
183     warndlg('Debe ser un número positivo')
184 end
185 function MUin_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
186 if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get
(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
187     set(hObject,'BackgroundColor','white');
188 end
189 function MUout_Callback(hObject, eventdata, handles)
190 if isempty(str2num(get(handles.MUout,'String')) || str2num(get(handles.
MUout,'String'))<=0
191     set(handles.MUout,'String','0');
192     warndlg('Debe ser un número positivo')
193 end
194 function MUout_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
195 if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get
(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
196     set(hObject,'BackgroundColor','white');
197 end
198 function Dsmax_Callback(hObject, eventdata, handles)
199 if isempty(str2num(get(handles.Dsmax,'String')) || str2num(get(handles.
Dsmax,'String'))<=0
200     set(handles.Dsmax,'String','0');
201     warndlg('Debe ser un número positivo')
202 end
203 function Dsmax_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
204 if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get
(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
205     set(hObject,'BackgroundColor','white');
206 end
207 function Lmax_Callback(hObject, eventdata, handles)
208 if isempty(str2num(get(handles.Lmax,'String')) || str2num(get(handles.
Lmax,'String'))<=0
209     set(handles.Lmax,'String','0');
210     warndlg('Debe ser un número positivo')
211 end
212 function Lmax_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
213 if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get
(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
214     set(hObject,'BackgroundColor','white');
215 end
216 function kw_Callback(hObject, eventdata, handles)
217 if isempty(str2num(get(handles.kw,'String')) || str2num(get(handles.kw,'String'))<=0
218     set(handles.kw,'String','0');
219     warndlg('Debe ser un número positivo')
220 end
221 function kw_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
222 if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get
(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
223     set(hObject,'BackgroundColor','white');

```



## ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```

224 end
225 function Li_Callback(hObject, eventdata, handles)
226 if isempty(str2num(get(handles.Li,'String'))) || str2num(get(handles.Li,'String')) ✓
<1
227     set(handles.Li,'String','0');
228     warndlg('Debe ser un número mayor o igual que 1')
229 end
230 function Li_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
231 if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get ✓
(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
232     set(hObject,'BackgroundColor','white');
233 end
234 function Lo_Callback(hObject, eventdata, handles)
235 if isempty(str2num(get(handles.Lo,'String'))) || str2num(get(handles.Lo,'String')) ✓
<1
236     set(handles.Lo,'String','0');
237     warndlg('Debe ser un número mayor o igual que 1')
238 end
239 function Lo_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
240 if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get ✓
(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
241     set(hObject,'BackgroundColor','white');
242 end
243 function Rft_Callback(hObject, eventdata, handles)
244 if isempty(str2num(get(handles.Rft,'String'))) || str2num(get(handles. ✓
Rft,'String'))<0
245     set(handles.Rft,'String','0');
246     warndlg('Debe ser un número mayor o igual que 0')
247 end
248 function Rft_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
249 if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get ✓
(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
250     set(hObject,'BackgroundColor','white');
251 end
252 function Rfs_Callback(hObject, eventdata, handles)
253 if isempty(str2num(get(handles.Rfs,'String'))) || str2num(get(handles. ✓
Rfs,'String'))<0
254     set(handles.Rfs,'String','0');
255     warndlg('Debe ser un número mayor o igual que 0')
256 end
257 function Rfs_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
258 if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get ✓
(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
259     set(hObject,'BackgroundColor','white');
260 end
261 function Bc_Callback(hObject, eventdata, handles)
262 if isempty(str2num(get(handles.Bc,'String'))) || str2num(get(handles.Bc,'String')) ✓
<10 || str2num(get(handles.Bc,'String'))>50
263     set(handles.Rfs,'String','25');
264     warndlg('Debe ser un número entre 10 y 50')
265 end
266 function Bc_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
267 if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get ✓

```

## ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```

(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
268     set(hObject,'BackgroundColor','white');
269 end
270 function Mt_Callback(hObject, eventdata, handles)
271 if isempty(str2num(get(handles.Mt,'String')) || str2num(get(handles.Mt,'String'))
<=0
272     set(handles.Mt,'String','0');
273     warndlg('Debe ser un número mayor que 0')
274 end
275 function Mt_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
276 if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get
(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
277     set(hObject,'BackgroundColor','white');
278 end
279 function Ms_Callback(hObject, eventdata, handles)
280 if isempty(str2num(get(handles.Ms,'String')) || str2num(get(handles.Ms,'String'))
<0
281     set(handles.Ms,'String','0');
282     warndlg('Debe ser un número mayor que 0')
283 end
284 function Ms_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
285 if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get
(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
286     set(hObject,'BackgroundColor','white');
287 end
288 function delPtmax_Callback(hObject, eventdata, handles)
289 if isempty(str2num(get(handles.delPtmax,'String')) || str2num(get(handles.
delPtmax,'String'))<0
290     set(handles.delPtmax,'String','0');
291     warndlg('Debe ser un número mayor que 0')
292 end
293 function delPtmax_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
294 if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get
(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
295     set(hObject,'BackgroundColor','white');
296 end
297 function delPsmx_Callback(hObject, eventdata, handles)
298 if isempty(str2num(get(handles.delPsmx,'String')) || str2num(get(handles.
delPsmx,'String'))<0
299     set(handles.delPsmx,'String','0');
300     warndlg('Debe ser un número mayor que 0')
301 end
302 function delPsmx_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
303 if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get
(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
304     set(hObject,'BackgroundColor','white');
305 end
306 function Ntp_Callback(hObject, eventdata, handles)
307 if isempty(str2num(get(handles.Ntp,'String')) || str2num(get(handles.
Ntp,'String'))<1
308     set(handles.Ntp,'String','0');
309     warndlg('Debe ser un número mayor o igual que 1')
310 end

```

## ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```

311 function Ntp_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
312 if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(
(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
313     set(hObject,'BackgroundColor','white');
314 end
315 function layout_SelectionChangeFcn(hObject, eventdata, handles)
316 if get(handles.layout,'SelectedObject') == handles.cuadrado
317 set(handles.angle,'enable','on')
318 else
319 set(handles.angle,'enable','off')
320 end
321 function angle_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
322 if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(
(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
323     set(hObject,'BackgroundColor','white');
324 end
325 function angle_Callback(hObject, eventdata, handles)
326 function Elegirpunto_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
327 function Obtenerpunto_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
328 function cabezal_SelectionChangeFcn(hObject, eventdata, handles)
329 %Representación del valor actual del slider 'pasos'
330 function pasos_Callback(hObject, eventdata, handles)
331 if get(hObject,'Value')<= 2
332     pasos=1;
333 else if get(hObject,'Value')== get(hObject,'Max')
334     pasos=get(hObject,'Max');
335     else
336         pasos=fix(get(hObject,'Value')/2)*2;
337     end
338 end
339 set(handles.text5,'String',pasos);
340 function pasos_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
341 if isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(
(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
342     set(hObject,'BackgroundColor',[.9 .9 .9]);
343 end
344 %CALCULAR
345 %%%Función que se ejecuta tras la pulsación del botón 'pushbutton1', calcular
346 function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
347 vtmin=str2num(get(handles.vtmin,'String'));
348 vtmax=str2num(get(handles.vtmax,'String'));
349 vsmin=str2num(get(handles.vxmin,'String'));
350 vsmax=str2num(get(handles.vxmax,'String'));
351 Ttin=str2num(get(handles.Ttin,'String'));
352 Ttout=str2num(get(handles.Ttout,'String'));
353 Tsin=str2num(get(handles.Tsin,'String'));
354 Tsout=str2num(get(handles.Tsout,'String'));
355 kt=str2num(get(handles.ks,'String'));
356 Cpt=str2num(get(handles.Cpt,'String'));
357 ks=str2num(get(handles.ks,'String'));
358 Cps=str2num(get(handles.Cps,'String'));
359 ROT=str2num(get(handles.ROT,'String'));
360 MUtin=str2num(get(handles.MUtin,'String'));

```

## ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```

361 MUtout=str2num(get(handles.MUtout,'String'));
362 ROs=str2num(get(handles.ROs,'String'));
363 MUsin=str2num(get(handles.MUsin,'String'));
364 MUsout=str2num(get(handles.MUsout,'String'));
365 Dsmax=str2num(get(handles.Dsmax,'String'));
366 Lmax=str2num(get(handles.Lmax,'String'));
367 kw=str2num(get(handles.kw,'String'));
368 Li=str2num(get(handles.Li,'String'));
369 Lo=str2num(get(handles.Lo,'String'));
370 Rft=str2num(get(handles.Rft,'String'));
371 Rfs=str2num(get(handles.Rfs,'String'));
372 Mt=str2num(get(handles.Mt,'String'));
373 Ms=str2num(get(handles.Ms,'String'));
374 Bc=str2num(get(handles.Bc,'String'));
375 delPtmax=str2num(get(handles.delPtmax,'String'));
376 delPsmx=str2num(get(handles.delPsmx,'String'));
377 if get(handles.pasos,'Value')<= 2
378     pasos=1;
379 else if get(handles.pasos,'Value')== get(handles.pasos,'Max')
380     pasos=get(handles.pasos,'Max');
381 else
382     pasos=fix(get(handles.pasos,'Value')/2)*2;
383 end
384 end
385 set(handles.text5,'String',pasos);
386 Ntp=pasos;
387 if get(handles.cuadrado,'Value')==1
388     forma=2;
389     if get(handles.angle,'Value')==1
390         angle=2;
391     else
392         angle=3;
393     end
394 else
395     forma=1;
396     angle=1;
397 end
398
399 if get(handles.Fijo,'Value')==1
400     bundletype=1;
401 else if get(handles.Floteexterno,'Value')
402     bundletype=2;
403     else if get(handles.Anillosdivididos,'Value')==1
404         bundletype=3;
405     else
406         bundletype=4;
407     end
408 end
409 end
410 %Comprobación de que están todos los datos, en caso de faltar alguno o ser
411 %incorrecto, se detiene el programa y se vuelve a solicitar mediante un
412 %mensaje de error.
413 if isempty(vtmin) || vtmin<=0

```

## ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```

414     warndlg('Falta vtmin por introducir')
415     return
416 end
417 if isempty(vtmax) || vtmax<=0
418     warndlg('Falta vtmax por introducir')
419     return
420 end
421 if isempty(vsmin) || vsmin<=0
422     warndlg('Falta vsmin por introducir')
423     return
424 end
425 if isempty(vsmax) || vsmax<=0
426     warndlg('Falta vsmax por introducir')
427     return
428 end
429 if isempty(Ttin) || Ttin<=0
430     warndlg('Falta Ttin por introducir')
431     return
432 end
433 if isempty(Ttout) || Ttout<=0
434     warndlg('Falta Ttout por introducir')
435     return
436 end
437 if isempty(Tsin) || Tsin<=0
438     warndlg('Falta Tsin por introducir')
439     return
440 end
441 if isempty(Tsout) || Tsout<=0
442     warndlg('Falta Tsout por introducir')
443     return
444 end
445 if isempty(kt) || kt<=0
446     warndlg('Falta kt por introducir')
447     return
448 end
449 if isempty(Cpt) || Cpt<=0
450     warndlg('Falta Cpt por introducir')
451     return
452 end
453 if isempty(ks) || ks<=0
454     warndlg('Falta ks por introducir')
455     return
456 end
457 if isempty(Cps) || Cps<=0
458     warndlg('Falta Cps por introducir')
459     return
460 end
461 if isempty(ROt) || ROt<=0
462     warndlg('Falta ROt por introducir')
463     return
464 end
465 if isempty(MUtin) || MUtin<=0
466     warndlg('Falta MUt por introducir')

```

## ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```

467     return
468 end
469 if isempty(MUtout) || MUtout<=0
470     warndlg('Falta MUtout por introducir')
471     return
472 end
473 if isempty(ROs) || ROs<=0
474     warndlg('Falta ROs por introducir')
475     return
476 end
477 if isempty(MUsin) || MUSin<=0
478     warndlg('Falta MUs por introducir')
479     return
480 end
481 if isempty(MUsout) || MUsout<=0
482     warndlg('Falta MUsout por introducir')
483     return
484 end
485 if isempty(Dsmax) || Dsmax<=0
486     warndlg('Falta Dsmax por introducir')
487     return
488 end
489 if isempty(Lmax) || Lmax<=0
490     warndlg('Falta Lmax por introducir')
491     return
492 end
493 if isempty(kw) || kw<=0
494     warndlg('Falta kw por introducir')
495     return
496 end
497 if isempty(Li) || Li<1
498     warndlg('Falta Li por introducir')
499     return
500 end
501 if isempty(Lo) || Lo<1
502     warndlg('Falta Lo por introducir')
503     return
504 end
505 if isempty(Ntp) || Ntp<=0
506     warndlg('Falta Ntp por introducir')
507     return
508 end
509 if isempty(Rft) || Rft<0
510     warndlg('Falta Rft por introducir')
511     return
512 end
513 if isempty(Rfs) || Rfs<0
514     warndlg('Falta Rfs por introducir')
515     return
516 end
517 if isempty(Mt) || Mt<=0
518     warndlg('Falta Mt por introducir')
519     return

```

## ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```

520 end
521 if isempty(Ms) || Ms<=0
522     warndlg('Falta Ms por introducir')
523     return
524 end
525 if isempty(Bc) || Bc<=0
526     warndlg('Falta Bc por introducir')
527     return
528 end
529 if isempty(delPtmax) || delPtmax<=0
530     warndlg('Falta delPtmax por introducir')
531     return
532 end
533 if isempty(delPsmx) || delPsmx<=0
534     warndlg('Falta delPsmx por introducir')
535     return
536 end
537 %Comprobación de que las potencias térmicas son las mismas para ambos
538 %fluidos, y corrección del caudal másico de la carcasa en caso de no ser
539 %así
540 pott=abs(Ttin-Ttout)*Cpt*Mt;
541 pots=abs(Tsin-Tsout)*Cps*Ms;
542 if abs(pott-pots)/pott>0.01
543     Ms=pott/(Cps*abs(Tsin-Tsout));
544     set(handles.Ms,'string',Ms);
545     warndlg('Se ha corregido Ms')
546 end
547 %Guardado de variables en el documento variables.mat
548 save variables.mat vtmin vmax vsmin vmax Ttin Ttout Tsin Tsout kt Cpt ks Cps ROT
MUTin MUTout ROS MUsin MUsout Dsmax Lmax kw Li Lo Rft Rfs Mt Ms Bc delPtmax delPsmx
Ntp forma angle bundletype
549 %Se ejecuta el programa que obtiene la gráfica de pérdida de carga en los
550 %tubos vs. pérdida de carga en la carcasa para todas las restricciones
551 %'programamenu', así como la función para obtener el intercambiador de
552 %mínimo coste 'TACminimo'
553 set(handles.Obtenerpunto,'Enable','on')
554 programamenu
555 axes(handles.axes2)
556 imshow('grafica.png');
557 TACminimo
558 load punto
559 if punto==0
560 set(handles.soldelPtmin,'String','ERROR');
561 set(handles.soldelPsmx,'String','ERROR');
562 set(handles.solDsmin,'String','ERROR');
563 set(handles.solLmin,'String','ERROR');
564 set(handles.solTACmin,'String','ERROR');
565 set(handles.solAmin,'String','ERROR');
566 set(handles.solRbsmin,'String','ERROR');
567 set(handles.solVtmin,'String','ERROR');
568 set(handles.solVsmin,'String','ERROR');
569 set(handles.puntominTAC,'String','ERROR')
570 warndlg('Ningún intercambiador cumple todas las restricciones. Puede reducirlas')

```

## ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```

aumentando la Lmax, Dmax, n° de pasos...')
571 else
572 load valorpunto
573 %Tras obtener los valores del intercambiador de mínimo coste TAC, se
574 %representan dichos valores en la interfaz del programa
575 TAC=TAC*0.8016; %#ok<*NODEF> %$ a €
576 set(handles.soldelPtmin, 'String', sprintf('%8.2f', delPt));
577 set(handles.soldelPsmín, 'String', sprintf('%8.2f', delPs));
578 set(handles.solDsmin, 'String', sprintf('%8.2f', Ds));
579 set(handles.solLmin, 'String', sprintf('%8.2f', Ltt));
580 set(handles.solTACmin, 'String', sprintf('%8.2f', TAC));
581 set(handles.solAmin, 'String', sprintf('%8.2f', A));
582 set(handles.solRbsmin, 'String', sprintf('%8.2f', Rbs));
583 set(handles.solVtmin, 'String', sprintf('%8.2f', vt));
584 set(handles.solVsmin, 'String', sprintf('%8.2f', vs));
585 if punto==1
586     set(handles.puntominTAC, 'String', 'VtminRbsmin')
587 end
588 if punto==2
589     set(handles.puntominTAC, 'String', 'DsmaxRbsmin')
590 end
591 if punto==3
592     set(handles.puntominTAC, 'String', 'VtminVsmax')
593 end
594 if punto==4
595     set(handles.puntominTAC, 'String', 'DsmaxVsmax')
596 end
597 if punto==5
598     set(handles.puntominTAC, 'String', 'VtmaxRbsmin')
599 end
600 if punto==6
601     set(handles.puntominTAC, 'String', 'VtmaxVsmax')
602 end
603 if punto==7
604     set(handles.puntominTAC, 'String', 'VtminVsmin')
605 end
606 if punto==8
607     set(handles.puntominTAC, 'String', 'DsmaxVsmin')
608 end
609 if punto==9
610     set(handles.puntominTAC, 'String', 'VtminPsmax')
611 end
612 end
613 %La función Obtenerpunto se ejecuta al pulsar dicho botón, calculando los
614 %parámetros del punto seleccionado mediante el programa 'obtencionpunto'
615 function Obtenerpunto_Callback(hObject, eventdata, handles)
616 if get(handles.Elegirpunto, 'SelectedObject') == handles.VtminRbsmin
617     punto=1;
618 end
619 if get(handles.Elegirpunto, 'SelectedObject') == handles.DsmaxRbsmin
620     punto=2;
621 end
622 if get(handles.Elegirpunto, 'SelectedObject') == handles.VtminVsmax

```



## ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```

623     punto=3;
624 end
625 if get(handles.Elegirpunto,'SelectedObject') == handles.DsmaxVsmax
626     punto=4;
627 end
628 if get(handles.Elegirpunto,'SelectedObject') == handles.VtmaxRbsmin
629     punto=5;
630 end
631 if get(handles.Elegirpunto,'SelectedObject') == handles.VtmaxVsmax
632     punto=6;
633 end
634 if get(handles.Elegirpunto,'SelectedObject') == handles.VtminVsmin
635     punto=7;
636 end
637 if get(handles.Elegirpunto,'SelectedObject') == handles.DsmaxVsmin
638     punto=8;
639 end
640 if get(handles.Elegirpunto,'SelectedObject') == handles.VtminDelPsmx
641     punto=9;
642 end
643 save punto.mat punto
644 obtencionpunto
645 load valorpunto
646 %El valor obtenido mediante 'obtencionpunto' queda guardado en
647 %'valorpunto.mat', que utilizamos para representar los parámetros del punto
648 %seleccionado en la interfaz del programa
649 TAC=TAC*0.8016; %$ a €
650 set(handles.soldelPt,'String',sprintf('%8.2f',delPt));
651 set(handles.soldelPs,'String',sprintf('%8.2f',delPs));
652 set(handles.soldDs,'String',sprintf('%8.2f',Ds));
653 set(handles.solL,'String',sprintf('%8.2f',Ltt));
654 set(handles.solTAC,'String',sprintf('%8.2f',TAC));
655 set(handles.solA,'String',sprintf('%8.2f',A));
656 set(handles.solRbs,'String',sprintf('%8.2f',Rbs));
657 set(handles.solVt,'String',sprintf('%8.2f',vt));
658 set(handles.solVs,'String',sprintf('%8.2f',vs));

```

## ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```

1 %programamenu
2 %permite obtener las curvas que delimitan el área factible de
3 %intercambiadores, es decir, los intercambiadores que cumplen las
4 %restricciones especificadas.
5 %VARIABLES DE ENTRADA
6 %Bc es el corte del deflector
7 %Cps y Cpt son los calores específicos de ambos fluidos
8 %Dsmax es el diámetro máximo de la carcasa
9 %Lmax es la longitud máxima de los tubos
10 %Li y Lo son las separaciones de los deflectores a la entrada y a la salida
11 %MUsin, MUsout, MUTin y MUTout son las viscosidades de los fluidos a la
12 %temperatura de entrada y de salida
13 %Ms y Mt son los caudales máxicos para ambos fluidos
14 %ROs y ROt son las densidades de ambos fluidos
15 %Ntp son el número de pasos por los tubos
16 %Rfs y Rft son las resistencias de ensuciamiento para ambos fluidos
17 %Tsin, Tsout, Ttin y Ttout son las temperaturas de entrada y salida de los
18 %fluidos
19 %angle y forma determinan el layout de los tubos
20 %bundletype es el tipo de cabezal
21 %delPsmx y delPtmax son las pérdidas de carga máxicas admisibles en
22 %carcasa y tubos respectivamente
23 %ks y kt son las conductividades térmicas de los fluidos
24 %kw es la conductividad térmica del material de los tubos
25 %vsmx, vsmin, vtmax y vtmin son las velocidades límites para ambos fluidos
26 %VARIABLES INTERNAS DEL PROGRAMA
27 %Rbsmax y Rbsmin son la relación entre la separacion de los deflectores y
28 %el diámetro de la carcasa máxica y mínima
29 %Dt y Dti son el diámetro externo e interno de los tubos, respectivamente
30 %Ltp es la separación entre los tubos (tube pitch)
31 %Ns es el número de pasos por la carcasa
32 %SALIDA
33 %Se obtiene el gráfico con las curvas Vtmin, Vtmax, Vsmin, Vsmax, Dsmax,
34 %Lmax, Rbsmax y Rbsmin. Delimitando el área factible.grafica.png
35 load variables
36 if Ttin>Tsin
37     Thi=Ttin;
38     Tho=Tto;
39     Tci=Tsin;
40     Tco=Tsout;
41 else
42     Thi=Tsin;
43     Tho=Tsout;
44     Tci=Ttin;
45     Tco=Ttout;
46 end
47 Ttav=(Ttin+Ttout)/2; Tsav=(Tsin+Tsout)/2;
48 Rbsmax=1;
49 Rbsmin=0.2;
50 %Tube-side datos
51 Dt=19.1; Dti=15.4; Ltp=1.25*Dt;
52 layout=[forma angle];
53 Ns=1;

```

## ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```

54 S=(Tco-Tci)/(Thi-Tci);R=(Thi-Tho)/(Tco-Tci);
55 P=(1-((R*S-1)/(S-1))^(1/Ntp))/(R-((R*S-1)/(S-1))^(1/Ntp));
56 F=(sqrt(R^2+1)*log((1-P)/(1-R*P)))/((R-1)*log((2/P-1-R+sqrt(R^2+1))/(2/P-R-1-sqrt(
(R^2+1)))));
57 while F<0.8
58     Ntp=Ntp+1;
59 P=(1-((R*S-1)/(S-1))^(1/Ntp))/(R-((R*S-1)/(S-1))^(1/Ntp));
60 F=(sqrt(R^2+1)*log((1-P)/(1-R*P)))/((R-1)*log((2/P-1-R+sqrt(R^2+1))/(2/P-R-1-sqrt(
(R^2+1)))));
61 end
62 LMTD=((Thi-Tco)-(Tho-Tci))/log((Thi-Tco)/(Tho-Tci));
63 Q=Mt*abs(Ttin-Ttout)*Cpt;
64 if layout(1)==2
65     De=4*(Ltp^2-pi*Dt^2/4)/(pi*Dt);
66 else
67     De=4*(sqrt(3)*Ltp^2/4-pi*Dt^2/8)/(pi*Dt/2);
68 end
69 %TABLA A1 columnas (a1 a2 a3 a4 b1 b2 b3 b4) filas 30° Reynodls(10^5-10^4,10^4-
10^3,10^3-10^2,
70 %10^2-10,<10) 45°(10^5...) 90°(10^5...)
71 tablacoeff1=[0.321 0.321 0.593 1.36 1.4 0.37 0.37 0.73 0.498 1.55 0.37 0.107 0.408
0.9 0.97;-0.388 -0.388 -0.477 -0.657 -0.667 -0.396 -0.396 -0.5 -0.656 -0.667 -0.395
-0.266 -0.46 -0.631 -0.667;1.45 1.45 1.45 1.45 1.45 1.93 1.93 1.93 1.93 1.93 1.187
1.187 1.187 1.187;0.519 0.519 0.519 0.519 0.519 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.37 0.37
0.37 0.37 0.37; 0.372 0.486 4.57 45.1 48 0.303 0.333 3.5 26.2 32 0.391 0.0815 6.09 32.1
35; -0.123 -0.152 -0.476 -0.973 -1 -0.126 -0.136 -0.476 -0.913 -1 -0.148 0.022 -0.602
-0.963 -1;7 7 7 7 7 6.59 6.59 6.59 6.59 6.59 6.3 6.3 6.3 6.3 6.3; 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5
0.52 0.52 0.52 0.52 0.52 0.378 0.378 0.378 0.378 0.378]';
72 %TABLA 1
73 tablacoeffm=[8 39 44 87;0.01 0 0.025 0.007]';
74 %TABLA 2
75 tablacoeff2=[0.319 0.249 0.175 0.0743 0.0365;0.215 0.156 0.158 0.0402 0.0331;2.142
2.207 2.285 2.499 2.675;2.207 2.291 2.263 2.617 2.643]';
76 [m1,m2]=parametrosm(tablacoeffm,bundletype);
77 [K1,n]=parametrostabla2(layout,tablacoeff2,Ntp);
78 %Cálculos geometría
79 if layout(2)==2
80     Ltpe=0.707*Ltp;
81     Lpp=0.707*Ltp;
82 else if layout(2)==1
83     Ltpe=Ltp;
84     Lpp=0.866*Ltp;
85     else
86         Lpp=Ltp;
87         Ltpe=Ltp;
88     end
89 end
90 angleds=2*acos(1-2*(Bc/100))*360/(2*pi);
91 m3=(m2+1)/K1^(1/n);
92 MUt=MUtin;MUs=MUusin;MUtw=MUtin;MUsw=MUusin;%para empezar iteraciones
93 Prs=Cps*MUs/(10^3*ks);
94 C5=Q*10^6*(m3*Dt)^n/(pi*Dt*Ns*F*LMTD);
95 C7=Dt*Rft/Dti+Dt*log(Dt/Dti)/(2*10^3*kw)+Rfs;

```

## ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```

96 %%%CÁLCULO DE ZONA FACTIBLE
97 %%%vtmax boundary
98 for z=1:2
99 if z==1
100 curvavtmax=zeros(20,2);
101 vt=vtmax;
102 else
103     curvavtmin=zeros(20,2);
104     vt=vtmin;
105 end
106 Ret=ROt*vt*Dti/MUt;
107 Ntt=fix(((4*10^6*Mt*Ntp)/(pi*vt*ROt*Dti^2)/Ntp)+1)*Ntp;
108 Ds=m1+m3*Dt*(Ntt)^(1/n);
109 Lts=0.1*Ds;
110 if Lts<25
111     Lts=25;
112 end
113 Dotl=Dt*(Ntt/K1)^(1/n);
114 Lbb=Ds-Dotl;
115 Dctl=Dotl-Dt;
116 anglectl=2*acos((Ds/Dctl)*(1-2*Bc/100))*360/(2*pi);
117 Ftw= anglectl/360-sin(anglectl*2*pi/360)/(2*pi);
118 if Ret<=2100
119     ac=0.35;
120     Kt=16;
121     mt=-1;
122 else if Ret>10^5
123     ac=0.14;
124     Kt=0.046;
125     mt=-0.2;
126 else
127     ac=0.14;
128     Kt=0.0791;
129     mt=-0.25;
130 end
131 end
132 C1=(2*Kt*Ntp^(3+mt)*Ns*(4*10^6*Mt)^(2+mt)*(m3*Dt)^(n*(2+mt)))/(ROt*MUt^mt*
(MUt/MUtw)^(ac)*pi^(2+mt)*Dti^(5+mt));
133 C2=1.25*Ntp^3*Ns*(4*10^6*Mt)^2*(m3*Dt)^(2*n)/(ROt*pi^2*Dti^4);
134 Swg=pi/4*Ds^2*(angleds/360-sin(angleds*2*pi/360)/(2*pi));
135 Swt=Ntt*Ftw*pi/4*Dt^2;
136 Sw=Swg-Swt;
137 vs=vsmín;
138 Res=ROs*vs*De/MUs;
139 [a1,a2,a3,a4,b1,b2,b3,b4]=parametrostablal(Res,layout(2),tablacoeff1);
140 a=a3/(1+0.14*Res^(a4));
141 b=b3/(1+0.14*Res^(b4));
142 ch=a1*(1.33*Dt/Ltp)^(a)*(ROs*Dt/MUs)^(a2);
143 cp=b1*(1.33*Dt/Ltp)^(b)*(ROs*Dt/MUs)^(b2);
144 Lbc0=0.5*Ds;
145 Sm0=Lbc0*(Lbb+Dctl/Ltpe*(Ltp-Dt));
146 Lta0=1500;
147 Nb0=(Lta0-Lbc0*(Li+Lo))/Lbc0+1;

```

## ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```

148 Ntcc=Ds/Lpp*(1-2*(Bc/100));
149 Ntcw=0.8/Lpp*(Ds*(Bc/100));
150 Ks10=(Sm0/Sw)*((1+0.3*Ntcw)*Nb0*ROs)/((Nb0+1)*Ds);%considerando parámetros R=1
151 Ks20=((Nb0-1)/(Nb0+1)+((Ntcc+Ntcw)/(Ntcc*(Nb0+1))))*(1-2*(Bc/100))*(2*ROs*cp)/
((MUs/MUsw)^-0.14*Lpp);
152 Rp=-b2/(Ks10/(Ks20*vs^b2)+1);
153 Ks4=ch*(MUs/MUsw)^0.14*Prs^(-2/3)*ROs*Cps;%considerando Jtot=1
154 %C4 y C3 aproximación para empezar a iterar de Muralikrishna y Sehnoy
155 C3=2*0.4475*De^-1.19*Ns*Ms^1.81/(MUs^-0.19*ROs*(MUs/MUsw)^0.14*(1-Dt/Ltp)^1.81);
156 C4=Ks4*(10^6*Ms/ROs)^(1+a2)*(Lbb+Dctl*(Ltp-Dt)/Ltpe)^(1+a2);
157 %OBTENCIÓN DE 20 PUNTOS PARA LA GRÁFICA delPt vs delPs
158 for x=20:-1:1
159 delPt=(x/20)*delPtmax;
160 Ltt=(delPt-C2/(Ds-m1)^(2*n))*(Ds-m1)^(n*(2+mt))/C1;
161 Lta=Ltt-2*Lts;
162 Rp0=0;Ks40=0;C30=0;C40=0;vs0=0;contador=0;
163 %bucle de iteración para obtener las variables
164 while contador<1000 && (abs((vs-vs0)/vs)>0.01 || abs((C3-C30)/C3)>0.01 || abs((C4-
C40)/C4)>0.01 || abs((Ks4-Ks40)/Ks4)>0.01 || abs((Rp-Rp0)/Rp)>0.01);
165 contador=contador+1;
166 %mientras la variación de alguna variable sea mayor que un máximo (1%) se
167 %continúa ejecutando el bucle
168 Rp0=Rp;Ks40=Ks4;C30=C3;C40=C4;vs0=vs;
169 if Ret<=2100
170     C6=1860*kt/Dt*(MUt/MUtw)^0.14*(Cpt*MUt/(kt*10^3))^(1/3)*(4*10^6*Mt)^(1/3)*
(m3*Dt)^(n/3)/(pi*MUt)^(1/3);
171     Rbs=((Lta*(Ds-m1)^n/C5-C7-(Lta^(1/3)*(Ds-m1)^(n/3))/C6)*C4/Ds^(1+a2))^(1/
(1+a2));
172 else if Ret>10000
173     C10=27*kt/Dt*(Cpt*MUt/(10^3*kt))^(1/3)*(MUt/MUtw)^0.14*(4*10^6*Mt)^0.8*
(m3*Dt)^(0.8*n)*Ntp^0.8/(pi*Dti*MUt)^0.8;
174     Rbs=((Lta*(Ds-m1)^n/C5-C7-(Ds-m1)^(0.8*n)/C10)*C4/Ds^(1+a2))^(1/(1+a2));
175 else
176     C8=0.116*kt/Dt*(MUt/MUtw)^0.14*(Cpt*MUt/(kt*10^3))^(1/3);
177     C9=(4*10^6*Mt)^(2/3)*(m3*Dt)^(2*n/3)/(pi*MUt*Dti)^(2/3);
178     Rbs=((Lta*(Ds-m1)^n/C5-C7-1/(C8*(1+(Dti/Lta)^(2/3)))*(C9/(Ds-m1)^(2*n/3)
-125)))*C4/Ds^(1+a2))^(1/(1+a2));
179 end
180 end
181 Rbs=real(Rbs);

183 Lbc=Rbs*Ds;
184 Nb=(Lta-Lbc*(Li+Lo))/Lbc+1;
185 vs=(hs/Ks4)^(1/(1+a2));
186 Res=ROs*vs*De/MUs;
187 [a1,a2,a3,a4,b1,b2,b3,b4]=parametrostablal(Res,layout(2),tablacoeff1);
188 a=a3/(1+0.14*Res^(a4));
189 b=b3/(1+0.14*Res^(b4));
190 ch=a1*(1.33*Dt/Ltp)^(a)*(ROs*Dt/MUs)^(a2);
191 cp=b1*(1.33*Dt/Ltp)^(b)*(ROs*Dt/MUs)^(b2);
192 Sm=Lbc*(Lbb+Dctl/Ltpe*(Ltp-Dt));
193 %CORRECTION FACTORS for heat transfer and pressure drop
194 [Jtot,Rb,Rs,Rl] = correctionfactors(Ftw,Dctl,Lbb,angleds,Dt,Bc,Ds,Dotl,Ntt,Ntcc,

```

## ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```

Lpp,Lbc,Res,Nb,Sm);
195 %Shell-side pressure drop, Cálculo Rp y C3
196 if Res>=100 %turbulento
197 Ks1=(Sm/Sw)*((1+0.3*Ntcw)*Rl*Nb*ROs)/((Nb+1)*Ds);
198 Ks2=((Nb-1)/(Nb+1)*Rl+((Ntcc+Ntcw)/(Ntcc*(Nb+1))*Rs))*(1-2*(Bc/100))*(2*Rb*ROs*cp)/
((MUs/MUsw)^-0.14*Lpp);
199 Rp=-b2/(Ks1/(Ks2*vs^b2)+1);
200 Ks3=Ks1*vs^Rp+Ks2*vs^(Rp+b2);
201 else%laminar
202 Ntw=Ntt*Ftw;
203 Dw=4*Sw/(pi*Dt*Ntw+Ds*angleds/2);
204 k1=(26*10^3*Nb*Rl*MUs)/((Nb+1)*Ds*sqrt(Sw/Sm))*(Ntcw/(Ltp-Dt)+Lbc/Dw^2);
205 k2=Nb*Rl*ROs/((Nb+1)*Ds)*(Sm/Sw);
206 k3=((Nb-1)*Rl/(Nb+1)+(Ntcc+Ntcw)*Rs/(Ntcc*(Nb+1)))*(1-2*(Bc/100))*(2*Rb*ROs*cp)/
((MUs/MUsw)^-0.14*Lpp);
207 Rp=2-(k1+2*k2*vs+k3*(2+b2)*vs^(1+b2))/(k1+k2*vs+k3*vs^(1+b2));
208 Ks3=(k1*vs^-1+k2+k3*vs^b2)*vs^Rp;
209 end
210 C3=((Nb+1)/((Nb-1)+(Li+Lo)))*(Ks3^4*Ns*Ms^(2-Rp))/(ROs*10^-6*(Lbb+Dctl*(Ltp-Dt)/
/Ltpe))^(2-Rp);
211 %Shell-side heat transfer coefficient, Cálculo Ks4, C4
212 Prs=Cps*MUs/(10^3*ks);
213 Prt=Cpt*MUt/(10^3*kt);
214 Ks4=ch*(MUs/MUsw)^0.14*Prs^(-2/3)*ROs*Cps*Jtot;
215 C4=Ks4*(10^6*Ms/ROs)^(1+a2)*(Lbb+Dctl*(Ltp-Dt)/Ltpe)^(1+a2);
216 if Ret<=2100
217 ht=1860*kt/Dti*(Ret*Prt*Dti/Lta)^(1/3)*(MUt/MUtw)^(0.14);
218 else if Ret>10000
219     ht=27*kt/Dti*Ret^0.8*Prt^(1/3)*(MUt/MUtw)^(0.14);
220     else
221     ht=116*(Ret^(2/3)-125)*Prt^(1/3)*(1+Dti/Lta)^(2/3)*(MUt/MUtw)^(0.14);
222     end
223 end
224 Tw=real((Ttav+(Tsav-Ttav)/(1+ht/hs)));
225 [MUt,MUs,MUtw,MUsw] = viscosidades(MUtin,MUsin,MUtout,MUout,Tw,Ttin,Ttout,Tsin,
Ttout,ROt,ROs);
226 end
227 if Nb<0 && contador>1
228     delPs=0;
229 else
230 delPs=C3*Lta/(Rbs^(3-Rp)*Ds^(2-Rp));
231 hs=C4/(Rbs^(1+a2)*Ds^(1+a2));
232 end
233 if isnan(delPs)
234     delPs=10*delPsmax;
235 end
236 if z==1
237 curvavtmax(x,1)=delPt;
238     if imag(delPs)==0 && delPs>0
239         curvavtmax(x,2)=delPs;
240     else if x<20
241         curvavtmax(x,2)=curvavtmax(x+1,2);
242     else

```

## ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```

243         curvavtmax(x,2)=0;
244     end
245 end
246 else
247     curvavtmin(x,1)=delPt;
248     if imag(delPs)==0 && delPs>0
249         curvavtmin(x,2)=delPs;
250     else if x<20
251         curvavtmin(x,2)=curvavtmin(x+1,2);
252     else
253         curvavtmin(x,2)=0;
254     end
255 end
256 end
257 end
258 end
259 %%vsmx vsmin boundary
260 i=0; j=0;
261 for z=1:2
262     if z==1
263         vs=vsmx;
264     else
265         vs=vsmin;
266     end
267 Res=vs*De*ROs/MUs;
268 [a1,a2,a3,a4,b1,b2,b3,b4]=parametrostablal(Res,layout(2),tablacoeff1);
269 a=a3/(1+0.14*Res^(a4));
270 b=b3/(1+0.14*Res^(b4));
271 ch=a1*(1.33*Dt/Ltp)^(a)*(ROs*Dt/MUs)^(a2);
272 cp=b1*(1.33*Dt/Ltp)^(b)*(ROs*Dt/MUs)^(b2);
273 for x=1:20
274     Ds=(x/20)*Dsmax;
275     Ntt=((Ds-m1)/(m3*Dt))^n;
276     Dotl=Dt*(Ntt/K1)^(1/n);
277     Lbb=Ds-Dotl;
278     Dctl=Dotl-Dt;
279     Lbc=10^6*Ms/(vs*ROs*(Lbb+Dctl/Ltpe*(Ltp-Dt)));
280     Rbs=Lbc/Ds;
281     anglectl=2*acos((Ds/Dctl)*(1-2*Bc/100))*360/(2*pi);
282     Ftw= anglectl/360-sin(anglectl*2*pi/360)/(2*pi);
283     Swg=pi/4*Dc^2*(angleds/360-sin(angleds*2*pi/360)/(2*pi));
284     Swt=Ntt*Ftw*pi/4*Dt^2;
285     Sw=Swg-Swt;
286     Ntcc=Ds/Lpp*(1-2*(Bc/100));
287     vt=4*10^6*Mt*Ntp/(pi*ROt*Dti^2*Ntt);
288     Ret=ROt*vt*Dti/MUt;
289     if Ret<=2100
290         ac=0.35;
291         Kt=16;
292         mt=-1;
293     else if Ret>10^5
294         ac=0.14;
295         Kt=0.046;

```

## ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```

296     mt=-0.2;
297     else
298         ac=0.14;
299         Kt=0.0791;
300         mt=-0.25;
301     end
302 end
303 C1=(2*Kt*Ntp^(3+mt)*Ns*(4*10^6*Mt)^(2+mt)*(m3*Dt)^(n*(2+mt)))/(ROt*MUt^mt*
(MUt/MUtw)^(ac)*pi^(2+mt)*Dti^(5+mt));
304 C2=1.25*Ntp^3*Ns*(4*10^6*Mt)^2*(m3*Dt)^(2*n)/(ROt*pi^2*Dti^4);
305 Ks4=ch*(MUs/MUsw)^0.14*Prs^(-2/3)*ROs*Cps;%considerando Jtot=1
306 C4=Ks4*(10^6*Ms/ROs)^(1+a2)*(Lbb+Dctl*(Ltp-Dt)/Ltpe)^(1+a2);
307 Ks40=0;C40=0;contador=0;
308 Sm=Lbc*(Lbb+Dctl/Ltpe*(Ltp-Dt));
309 Nb0=5;
310 Ntcw=0.8/Lpp*(Ds*(Bc/100));
311 Ks10=(Sm/Sw)*((1+0.3*Ntcw)*Nb0*ROs)/((Nb0+1)*Ds);%considerando parámetros R=1
312 Ks20=((Nb0-1)/(Nb0+1)+((Ntcc+Ntcw)/(Ntcc*(Nb0+1)))*(1-2*(Bc/100))*(2*ROs*cp)/
((MUs/MUsw)^-0.14*Lpp);
313 Rp=-b2/(Ks10/(Ks20*vs^b2)+1);
314 Rp0=0;
315 C3=2*0.4475*De^-1.19*Ns*Ms^1.81/(MUs^-0.19*ROs*(MUs/MUsw)^0.14*(1-Dt/Ltp)^1.81);
316 C30=0;
317 syms Ltaa;
318 Lta=1000;
319 options=optimset('Display','off');
320 %bucle de iteración para obtener las variables
321 while contador<1000 && (abs((C3-C30)/C3)>0.01 || abs((C4-C40)/C4)>0.01 || abs((Ks4-
Ks40)/Ks4)>0.01 || abs((Rp-Rp0)/Rp)>0.01);
322     contador=contador+1;C30=C3;C40=C4;Ks40=Ks4;Rp0=Rp;
323     if Ret<=2100
324         C6=1860*kt/Dt*(MUt/MUtw)^0.14*(Cpt*MUt/(kt*10^3))^(1/3)*(4*10^6*Mt)^(1/3)*
(m3*Dt)^(n/3)/(pi*MUt)^(1/3);
325         Lta=fsolve(@ (Ltaa) -Ltaa*(Ds-m1)^n+C5*(Ds^(1+a2)*Rbs^(1+a2)/C4+Ltaa^(1/3)*(Ds-
m1)^(n/3)/C6+C7),Lta,options);
326     else if Ret>10000
327         C10=27*kt/Dt*(Cpt*MUt/(10^3*kt))^(1/3)*(MUt/MUtw)^0.14*(4*10^6*Mt)^0.8*
(m3*Dt)^(0.8*n)*Ntp^0.8/(pi*Dti*MUt)^0.8;
328         Lta=C5*(Ds^(1+a2)*Rbs^(1+a2)/C4+(Ds-m1)^(0.8*n)/C10+C7)/(Ds-m1)^n;
329     else
330         C8=0.116*kt/Dt*(MUt/MUtw)^0.14*(Cpt*MUt/(kt*10^3))^(1/3);
331         C9=(4*10^6*Mt)^(2/3)*(m3*Dt)^(2*n/3)/(pi*MUt*Dti)^(2/3);
332         Lta=fsolve(@ (Ltaa) -Ltaa/(Ds-m1)^n+C5*(Ds^(1+a2)*Rbs^(1+a2)/C4+1/(C8*(1+
Dti/Ltaa)^(2/3))*(C9/(Ds-m1)^(2*n/3)-125)+C7),Lta,options);
333     end
334 end
335 Lts=0.1*Ds;
336 if Lts<25
337     Lts=25;
338 end
339 Ltt=Lta+2*Lts;
340 Nb=fix((Lta-Lbc*(Li+Lo))/Lbc)+2;
341 if isreal(Nb)==0

```



## ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```

342     delPt=0;
343     break
344 end
345 delPt=C1*Ltt/(Ds-m1)^(n*(2+mt))+C2/(Ds-m1)^(2*n);
346 %CORRECTION FACTORS for heat transfer and pressure drop
347 [Jtot,Rb,Rs,Rl] = correctionfactors(Ftw,Dctl,Lbb,angleds,Dt,Bc,Ds,Dctl,Ntt,Ntcc,✓
Lpp,Lbc,Res,Nb,Sm);
348 %Shell-side pressure drop, Cálculo Rp y C3
349 if Res>=2100 %turbulento
350 Ks1=(Sm/Sw)*((1+0.3*Ntcw)*Rl*Nb*ROs)/((Nb+1)*Ds);
351 Ks2=((Nb-1)/(Nb+1)*Rl+((Ntcc+Ntcw)/(Ntcc*(Nb+1))*Rs))*(1-2*(Bc/100))*(2*Rb*ROs*cp)/✓
((MUs/MUsw)^-0.14*Lpp);
352 Rp=-b2/(Ks1/(Ks2*vs^b2)+1);
353 Ks3=Ks1*vs^Rp+Ks2*vs^(Rp+b2);
354 else%laminar
355 Ntw=Ntt*Ftw;
356 Dw=4*Sw/(pi*Dt*Ntw+Ds*angleds/2);
357 k1=(26*10^3*Nb*Rl*MUs)/((Nb+1)*Ds*sqrt(Sw/Sm))*(Ntcw/(Ltp-Dt)+Lbc/Dw^2);
358 k2=Nb*Rl*ROs/((Nb+1)*Ds)*(Sm/Sw);
359 k3=((Nb-1)*Rl/(Nb+1)+(Ntcc+Ntcw)*Rs/(Ntcc*(Nb+1)))*(1-2*(Bc/100))*(2*Rb*ROs*cp)/✓
((MUs/MUsw)^-0.14*Lpp);
360 Rp=2-(k1+2*k2*vs+k3*(2+b2)*vs^(1+b2))/(k1+k2*vs+k3*vs^(1+b2));
361 Ks3=(k1*vs^-1+k2+k3*vs^b2)*vs^Rp;%B15 no seguro si es exponente!!!
362 end
363 C3=((Nb+1)/((Nb-1)+(Li+Lo)))*(Ks3^4*Ns*Ms^(2-Rp))/(ROs*10^-6*(Lbb+Dctl*(Ltp-Dt)✓
/Ltpe))^(2-Rp);
364 Prs=Cps*MUs/(10^3*ks);
365 Prt=Cpt*MUt/(10^3*kt);
366 Ks4=ch*(MUs/MUsw)^0.14*Prs^(-2/3)*ROs*Cps*Jtot;
367 C4=Ks4*(10^6*Ms/ROs)^(1+a2)*(Lbb+Dctl*(Ltp-Dt)/Ltpe)^(1+a2);
368 hs=C4/(Rbs^(1+a2)*Ds^(1+a2));
369 if Ret<=2100
370 ht=1860*kt/Dti*(Ret*Prt*Dti/Lta)^(1/3)*(MUt/MUtw)^(0.14);
371 else if Ret>10000
372     ht=27*kt/Dti*Ret^0.8*Prt^(1/3)*(MUt/MUtw)^(0.14);
373     else
374     ht=116*(Ret^(2/3)-125)*Prt^(1/3)*(1+Dti/Lta)^(2/3)*(MUt/MUtw)^(0.14);
375     end
376 end
377 if isnan(hs)==0

379 [MUt,MUs,MUtw,MUsw] = viscosidades(MUtin,MUsin,MUtout,MUsout,Tw,Ttin,Ttout,Tsin,✓
Tsout,ROt,ROs);
380 end
381 end
382 delPs=C3*Lta/(Rbs^(3-Rp)*Ds^(2-Rp));
383 if z==1
384     if delPt~=0
385         i=i+1;
386         curvavsmat(i,1)=real(delPt); %#ok<*SAGROW>
387         curvavsmat(i,2)=real(delPs);
388     end
389 else

```

## ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```

390     if delPt~=0
391         j=j+1;
392         curvavxmin(j,1)=real(delPt);
393         curvavxmin(j,2)=real(delPs);
394     end
395 end
396 end
397 end
398 %%Dsmax boundary
399 Ds=Dsmax;
400 Ntt=fix(((Ds-m1)/(m3*Dt))^n/Ntp)*Ntp;
401 Dotl=Dt*(Ntt/K1)^(1/n);
402 Lbb=Ds-Dotl;
403 Dctl=Dotl-Dt;
404 anglectl=2*acos((Ds/Dctl)*(1-2*Bc/100))*360/(2*pi);
405 Ftw= anglectl/360-sin(anglectl*2*pi/360)/(2*pi);
406 Swg=pi/4*D2*(angleds/360-sin(angleds*2*pi/360)/(2*pi));
407 Swt=Ntt*Ftw*pi/4*D2;
408 Sw=Swg-Swt;
409 vs=1;
410 Res=ROs*vs*Dt/MUs;%De en mm
411 [a1,a2,a3,a4,b1,b2,b3,b4]=parametrostablal(Res,layout(2),tablacoef1);
412 a=a3/(1+0.14*Res^(a4));
413 b=b3/(1+0.14*Res^(b4));
414 ch=a1*(1.33*Dt/Ltp)^(a)*(ROs*Dt/MUs)^(a2);
415 cp=b1*(1.33*Dt/Ltp)^(b)*(ROs*Dt/MUs)^(b2);
416 Lbc0=0.5*Ds;%valor inicial para Lbc
417 Sm0=Lbc0*(Lbb+Dctl/Ltpe*(Ltp-Dt));
418 Lta0=1500;Nb0=(Lta0-Lbc0*(Li+Lo))/Lbc0+1;
419 Ntcc=Ds/Lpp*(1-2*(Bc/100));
420 Ntcw=0.8/Lpp*(Ds*(Bc/100));
421 Ks10=(Sm0/Sw)*((1+0.3*Ntcw)*Nb0*ROs)/((Nb0+1)*Ds);%considerando parámetros R=1
422 Ks20=((Nb0-1)/(Nb0+1)+((Ntcc+Ntcw)/(Ntcc*(Nb0+1)))*(1-2*(Bc/100))*(2*ROs*cp)/
(MUs/MUsw)^-0.14*Lpp);
423 Rp=-b2/(Ks10/(Ks20*vs^b2)+1);
424 Ks4=ch*(MUs/MUsw)^0.14*Prs^(-2/3)*ROs*Cps;%considerando Jtot=1
425 vt=4*10^6*Mt*Ntp/(pi*ROt*Dti^2*Ntt);
426 Ret=ROt*vt*Dti/MUt;
427 if Ret<=2100
428     ac=0.35;
429     Kt=16;
430     mt=-1;
431 else if Ret>10^5
432     ac=0.14;
433     Kt=0.046;
434     mt=-0.2;
435 else
436     ac=0.14;
437     Kt=0.0791;
438     mt=-0.25;
439     end
440 end
441 C1=(2*Kt*Ntp^(3+mt)*Ns*(4*10^6*Mt)^(2+mt)*(m3*Dt)^(n*(2+mt)))/(ROt*MUt^mt*

```

## ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```

(MUt/MUtw)^(ac)*pi^(2+mt)*Dti^(5+mt));
442 C2=1.25*Ntp^3*Ns*(4*10^6*Mt)^2*(m3*Dt)^(2*n)/(ROt*pi^2*Dti^4);
443 C3=2*0.4475*De^-1.19*Ns*Ms^1.81/(MUs^-0.19*ROs*(MUs/MUsw)^0.14*(1-Dt/Ltp)^1.81);
444 C4=Ks4*(10^6*Ms/ROs)^(1+a2)*(Lbb+Dct1*(Ltp-Dt)/Ltpe)^(1+a2);
445 for x=20:-1:1
446 delPt=(x/20)*delPtmax;
447 Lts=0.1*Ds;
448 if Lts<25
449     Lts=25;
450 end
451 Ltt=(delPt-C2/(Ds-m1)^(2*n))*(Ds-m1)^(n*(2+mt))/C1;
452 Lta=Ltt-2*Lts;
453 Rp0=0;
454 Ks40=0;
455 C30=0;
456 C40=0;
457 vs0=0;
458 contador=0;
459 %bucle de iteración para obtener las variables
460 while contador<1000 && (abs((vs-vs0)/vs)>0.01 || abs((C3-C30)/C3)>0.01 || abs((C4-
C40)/C4)>0.01 || abs((Ks4-Ks40)/Ks4)>0.01 || abs((Rp-Rp0)/Rp)>0.01);
461 contador=contador+1;
462 %mientras la variación de alguna variable sea mayor que un máximo (1%) se
463 %continúa ejecutando el bucle
464 Rp0=Rp;Ks40=Ks4;C30=C3;C40=C4;vs0=vs;
465 %Cálculo Rbs
466 if Ret<=2100
467     C6=1860*kt/Dt*(MUt/MUtw)^0.14*(Cpt*MUt/(kt*10^3))^(1/3)*(4*10^6*Mt)^(1/3)*
(m3*Dt)^(n/3)/(pi*MUt)^(1/3);
468     Rbs=((Lta*(Ds-m1)^n/C5-C7-(Lta^(1/3)*(Ds-m1)^(n/3))/C6)*C4/Ds^(1+a2))^(1/
(1+a2));
469 else if Ret>10000
470     C10=27*kt/Dt*(Cpt*MUt/(10^3*kt))^(1/3)*(MUt/MUtw)^0.14*(4*10^6*Mt)^0.8*
(m3*Dt)^(0.8*n)*Ntp^0.8/(pi*Dti*MUt)^0.8;
471     Rbs=((Lta*(Ds-m1)^n/C5-C7-(Ds-m1)^(0.8*n)/C10)*C4/Ds^(1+a2))^(1/(1+a2));
472 else
473     C8=0.116*kt/Dt*(MUt/MUtw)^0.14*(Cpt*MUt/(kt*10^3))^(1/3);
474     C9=(4*10^6*Mt)^(2/3)*(m3*Dt)^(2*n/3)/(pi*MUt*Dti)^(2/3);
475     Rbs=((Lta*(Ds-m1)^n/C5-C7-1/(C8*(1+(Dti/Lta)^(2/3)))*(C9/(Ds-m1)^(2*n/3)
-125)))*C4/Ds^(1+a2))^(1/(1+a2));
476 end
477 end
478 hs=C4/(Rbs^(1+a2)*Ds^(1+a2));
479 Lbc=Rbs*Ds;
480 Nb=(Lta-Lbc*(Li+Lo))/Lbc+1;
481 vs=(hs/Ks4)^(1/(1+a2));
482 %Cálculo Reynolds shell
483 Res=ROs*vs*Dt/MUs;
484 [a1,a2,a3,a4,b1,b2,b3,b4]=parametrostablal(Res,layout(2),tablacoeff1);
485 a=a3/(1+0.14*Res^(a4));
486 b=b3/(1+0.14*Res^(b4));
487 ch=a1*(1.33*Dt/Ltp)^(a)*(ROs*Dt/MUs)^(a2);
488 cp=b1*(1.33*Dt/Ltp)^(b)*(ROs*Dt/MUs)^(b2);

```

## ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```

489 Sm=Lbc*(Lbb+Dctl/Ltpe*(Ltp-Dt));
490 %CORRECTION FACTORS for heat transfer and pressure drop
491 [Jtot,Rb,Rs,Rl] = correctionfactors(Ftw,Dctl,Lbb,angleds,Dt,Bc,Ds,Dctl,Ntt,Ntcc,
Lpp,Lbc,Res,Nb,Sm);
492 %Shell-side pressure drop, Cálculo Rp y C3
493 if Res>=100 %turbulento
494 Ks1=(Sm/Sw)*((1+0.3*Ntcw)*Rl*Nb*ROs)/((Nb+1)*Ds);
495 Ks2=((Nb-1)/(Nb+1)*Rl+(Ntcc+Ntcw)/(Ntcc*(Nb+1))*Rs)*(1-2*(Bc/100))*(2*Rb*ROs*cp)/
((MUs/MUsw)^-0.14*Lpp);
496 Rp=-b2/(Ks1/(Ks2*vs^b2)+1);
497 Ks3=Ks1*vs^Rp+Ks2*vs^(Rp+b2);
498 else%laminar
499 Ntw=Ntt*Ftw;
500 Dw=4*Sw/(pi*Dt*Ntw+Ds*angleds/2);
501 k1=(26*10^3*Nb*Rl*MUs)/((Nb+1)*Ds*sqrt(Sw/Sm))*(Ntcw/(Ltp-Dt)+Lbc/Dw^2);
502 k2=Nb*Rl*ROs/((Nb+1)*Ds)*(Sm/Sw);
503 k3=((Nb-1)*Rl/(Nb+1)+(Ntcc+Ntcw)*Rs/(Ntcc*(Nb+1)))*(1-2*(Bc/100))*(2*Rb*ROs*cp)/
((MUs/MUsw)^-0.14*Lpp);
504 Rp=2-(k1+2*k2*vs+k3*(2+b2)*vs^(1+b2))/(k1+k2*vs+k3*vs^(1+b2));
505 Ks3=(k1*vs^-1+k2+k3*vs^b2)*vs^Rp;%B15 no seguro si es exponente!!!
506 end
507 C3=((Nb+1)/((Nb-1)+(Li+Lo)))*(Ks3^4*Ns*Ms^(2-Rp))/(ROs*10^-6*(Lbb+Dctl*(Ltp-Dt)
/Ltpe))^(2-Rp);
508 %Shell-side heat transfer coefficient, Cálculo Ks4, C4
509 Prs=Cps*MUs/(10^3*ks);
510 Prt=Cpt*MUt/(10^3*kt);
511 Ks4=ch*(MUs/MUsw)^0.14*Prs^(-2/3)*ROs*Cps*Jtot;
512 C4=Ks4*(10^6*Ms/ROs)^(1+a2)*(Lbb+Dctl*(Ltp-Dt)/Ltpe)^(1+a2);
513 delPs=C3*Lta/(Rbs^(3-Rp)*Ds^(2-Rp));
514 if Ret<=2100
515 ht=1860*kt/Dti*(Ret*Prt*Dti/Lta)^(1/3)*(MUt/MUtw)^(0.14);
516 else if Ret>10000
517     ht=27*kt/Dti*Ret^0.8*Prt^(1/3)*(MUt/MUtw)^(0.14);
518 else
519     ht=116*(Ret^(2/3)-125)*Prt^(1/3)*(1+Dti/Lta)^(2/3)*(MUt/MUtw)^(0.14);
520 end
521 end
522 if isnan(hs)==0
523 Tw=Ttav+(Tsav-Ttav)/(1+ht/hv);
524 [MUt,MUs,MUtw,MUsw] = viscosidades(MUtin,MUsin,MUtout,MUout,Tw,Ttin,Ttout,Tsin,
Tsout,ROt,ROs);
525 end
526 end
527 if Lta<0
528     delPs=10*delPsmax;
529 end
530 %Cálculo deltaPs
531 curvadsmax(x,1)=real(delPt);
532 if real(delPs)<0 || real(Rbs)<0 || isnan(delPs)
533     curvadsmax(x,2)=0;
534 else
535     curvadsmax(x,2)=real(delPs);
536 end

```

## ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```

537     if x<20 && curvadsmax(x+1,2)>delPs
538         curvadsmax(x,2)=curvadsmax(x+1,2);
539     end
540 end
541 %Lmax boundary
542 Ltt=Lmax;
543 curvalmax=zeros(20,2);
544 for x=1:20
545     Ds=Dsmax*(x/23);
546     Ntt=((Ds-m1)/(m3*Dt))^n;
547     Dotl=Dt*(Ntt/K1)^(1/n);
548     Lbb=Ds-Dotl;
549     Dctl=Dotl-Dt;
550     anglectl=2*acos((Ds/Dctl)*(1-2*Bc/100))*360/(2*pi);
551     Ftw= anglectl/360-sin(anglectl*2*pi/360)/(2*pi);
552     Swg=pi/4*Dc^2*(angleds/360-sin(angleds*2*pi/360)/(2*pi));
553     Swt=Ntt*Ftw*pi/4*Dt^2;
554     Sw=Swg-Swt;
555     vs=vsmx;%inventada para empezar
556     Res=ROs*vs*De/MUs;%De en mm
557     [a1,a2,a3,a4,b1,b2,b3,b4]=parametrostablal(Res,layout(2),tablacoe1);
558     a=a3/(1+0.14*Res^(a4));
559     b=b3/(1+0.14*Res^(b4));
560     ch=a1*(1.33*Dt/Ltp)^(a)*(ROs*Dt/MUs)^(a2);
561     cp=b1*(1.33*Dt/Ltp)^(b)*(ROs*Dt/MUs)^(b2);
562     Lts=0.1*Dc;
563     if Lts<25
564         Lts=25;
565     end
566     Lta=Ltt-2*Lts;
567     vt=4*10^6*Mt*Ntp/(pi*ROt*Dti^2*Ntt);
568     Ret=ROt*vt*Dti/MUt;
569     if Ret<=2100
570         ac=0.35;
571         Kt=16;
572         mt=-1;
573     else if Ret>10^5
574         ac=0.14;
575         Kt=0.046;
576         mt=-0.2;
577     else
578         ac=0.14;
579         Kt=0.0791;
580         mt=-0.25;
581     end
582 end
583 C1=(2*Kt*Ntp^(3+mt)*Ns*(4*10^6*Mt)^(2+mt)*(m3*Dt)^(n*(2+mt)))/(ROt*MUt^mt*
(MUt/MUtw)^(ac)*pi^(2+mt)*Dti^(5+mt));
584 C2=1.25*Ntp^3*Ns*(4*10^6*Mt)^2*(m3*Dt)^(2*n)/(ROt*pi^2*Dti^4);
585 Lbc0=0.5*Dc;%valor inicial para Lbc
586 Nb0=(Lta-Lbc0*(Li+Lo))/Lbc0+1;
587 Ntcc=Ds/Lpp*(1-2*(Bc/100));
588 Ntcw=0.8/Lpp*(Ds*(Bc/100));

```

## ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```

589 Sm0=Lbc0*(Lbb+Dctl/Ltpe*(Ltp-Dt));
590 Ks10=(Sm0/Sw)*((1+0.3*Ntcw)*Nb0*ROs)/((Nb0+1)*Ds);%considerando parámetros R=1
591 Ks20=((Nb0-1)/(Nb0+1)+((Ntcc+Ntcw)/(Ntcc*(Nb0+1))))*(1-2*(Bc/100))*(2*ROs*cp)/
((MUs/MUsw)^-0.14*Lpp);
592 Rp=-b2/(Ks10/(Ks20*vs^b2)+1);
593 C3=2*0.4475*De^-1.19*Ns*Ms^1.81/(MUs^-0.19*ROs*(MUs/MUsw)^0.14*(1-Dt/Ltp)^1.81);
594 Ks4=ch*(MUs/MUsw)^0.14*Prs^(-2/3)*ROs*Cps;%considerando Jtot=1
595 C4=Ks4*(10^6*Ms/ROs)^(1+a2)*(Lbb+Dctl*(Ltp-Dt)/Ltpe)^(1+a2);
596 delPt=C1*Ltt/(Ds-m1)^(n*(2+mt))+C2/(Ds-m1)^(2*n);
597 Rp0=0;
598 Ks40=0;
599 C30=0;
600 C40=0;
601 vs0=0;
602 a20=0;
603 contador=0;
604 %bucle de iteración para obtener las variables
605 while contador<1000 && (abs((vs-vs0)/vs)>0.01 || abs((C3-C30)/C3)>0.01 || abs((C4-
C40)/C4)>0.01 || abs((Ks4-Ks40)/Ks4)>0.01 || abs((Rp-Rp0)/Rp)>0.01);
606 contador=contador+1;
607 Rp0=Rp;%no se utiliza
608 Ks40=Ks4;
609 C30=C3;%no se utiliza
610 C40=C4;
611 vs0=vs;
612
613 %Cálculo Rbs
614 if Ret<=2100
615     C6=1860*kt/Dt*(MUt/MUtw)^0.14*(Cpt*MUt/(kt*10^3))^(1/3)*(4*10^6*Mt)^(1/3)*
(m3*Dt)^(n/3)/(pi*MUt)^(1/3);
616     Rbs=((Lta*(Ds-m1)^n/C5-C7-(Lta^(1/3)*(Ds-m1)^(n/3))/C6)*C4/Ds^(1+a2))^(1/
(1+a2));
617 else if Ret>10000
618     C10=27*kt/Dt*(Cpt*MUt/(10^3*kt))^(1/3)*(MUt/MUtw)^0.14*(4*10^6*Mt)^0.8*
(m3*Dt)^(0.8*n)*Ntp^0.8/(pi*Dti*MUt)^0.8;
619     Rbs=((Lta*(Ds-m1)^n/C5-C7-(Ds-m1)^(0.8*n)/C10)*C4/Ds^(1+a2))^(1/(1+a2));
620 else
621     C8=0.116*kt/Dt*(MUt/MUtw)^0.14*(Cpt*MUt/(kt*10^3))^(1/3);
622     C9=(4*10^6*Mt)^(2/3)*(m3*Dt)^(2*n/3)/(pi*MUt*Dti)^(2/3);
623     Rbs=((Lta*(Ds-m1)^n/C5-C7-1/(C8*(1+(Dti/Lta)^(2/3)))*(C9/(Ds-m1)^(2*n/3))
624 end
625 end
626 Rbs=real(Rbs);
627 hs=C4/(Rbs^(1+a2)*Ds^(1+a2));
628 Lbc=Rbs*Ds;
629 Nb=fix((Lta-Lbc*(Li+Lo))/Lbc+1)+1;
630 vs=(hs/Ks4)^(1/(1+a2));
631 %Cálculo Reynolds shell
632 Res=ROs*vs*De/MUs;
633 [a1,a2,a3,a4,b1,b2,b3,b4]=parametrostablal(Res,layout(2),tablacoeff1);
634 a=a3/(1+0.14*Res^(a4));
635 b=b3/(1+0.14*Res^(b4));

```

## ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```

636 ch=a1*(1.33*Dt/Ltp)^(a)*(ROs*Dt/MUs)^(a2);
637 cp=b1*(1.33*Dt/Ltp)^(b)*(ROs*Dt/MUs)^(b2);
638 Sm=Lbc*(Lbb+Dctl/Ltpe*(Ltp-Dt));
639
640 %CORRECTION FACTORS for heat transfer and pressure drop
641 [Jtot,Rb,Rs,Rl] = correctionfactors(Ftw,Dctl,Lbb,angleds,Dt,Bc,Ds,Dctl,Ntt,Ntcc,
Lpp,Lbc,Res,Nb,Sm);
642
643 %Shell-side pressure drop, Cálculo Rp y C3
644 if Res>=100 %turbulento
645 Ks1=(Sm/Sw)*((1+0.3*Ntcw)*Rl*Nb*ROs)/((Nb+1)*Ds);
646 Ks2=((Nb-1)/(Nb+1)*Rl+(Ntcc+Ntcw)/(Ntcc*(Nb+1))*Rs)*(1-2*(Bc/100))*(2*Rb*ROs*cp)/
((MUs/MUsw)^-0.14*Lpp);
647 Rp=-b2/(Ks1/(Ks2*vs^b2)+1);
648 Ks3=Ks1*vs^Rp+Ks2*vs^(Rp+b2);
649 else%laminar
650 Ntw=Ntt*Ftw;
651 Dw=4*Sw/(pi*Dt*Ntw+Ds*angleds/2);
652 k1=(26*10^3*Nb*Rl*MUs)/((Nb+1)*Ds*sqrt(Sw/Sm))*(Ntcw/(Ltp-Dt)+Lbc/Dw^2);
653 k2=Nb*Rl*ROs/((Nb+1)*Ds)*(Sm/Sw);
654 k3=((Nb-1)*Rl/(Nb+1)+(Ntcc+Ntcw)*Rs/(Ntcc*(Nb+1)))*(1-2*(Bc/100))*(2*Rb*ROs*cp)/
((MUs/MUsw)^-0.14*Lpp);
655 Rp=2-(k1+2*k2*vs+k3*(2+b2)*vs^(1+b2))/(k1+k2*vs+k3*vs^(1+b2));
656 Ks3=(k1*vs^-1+k2+k3*vs^b2)*vs^Rp;%B15 no seguro si es exponente!!!
657 end
658 C3=((Nb+1)/((Nb-1)+(Li+Lo)))*(Ks3*4*Ns*Ms^(2-Rp))/(ROs*10^-6*(Lbb+Dctl*(Ltp-Dt)
/Ltpe))^(2-Rp);
659 Prs=Cps*MUs/(10^3*ks);
660 Prt=Cpt*MUt/(10^3*kt);
661 Ks4=ch*(MUs/MUsw)^0.14*Prs^(-2/3)*ROs*Cps*Jtot;
662 C4=Ks4*(10^6*Ms/ROs)^(1+a2)*(Lbb+Dctl*(Ltp-Dt)/Ltpe)^(1+a2);
663 hs=C4/(Rbs^(1+a2)*Ds^(1+a2));
664 if Ret<=2100
665 ht=1860*kt/Dti*(Ret*Prt*Dti/Lta)^(1/3)*(MUt/MUtw)^(0.14);
666 else if Ret>10000
667     ht=27*kt/Dti*Ret^0.8*Prt^(1/3)*(MUt/MUtw)^(0.14);
668     else
669     ht=116*(Ret^(2/3)-125)*Prt^(1/3)*(1+Dti/Lta)^(2/3)*(MUt/MUtw)^(0.14);
670     end
671 end
672 if isnan(hs)==0
673 Tw=Ttav+(Tsav-Ttav)/(1+ht/hs);
674 [MUt,MUs,MUtw,MUsw] = viscosidades(MUtin,MUsin,MUtout,MUsout,Tw,Ttin,Ttout,Tsin,
Tsout,ROt,ROs);
675 end
676 end
677 delPs=C3*Lta/(Rbs^(3-Rp)*Ds^(2-Rp));
678 %Cálculo deltaPs
679 curvalmax(x,1)=real(delPt);
680 if real(delPs)<0 || real(Rbs)<0
681     curvalmax(x,2)=0;
682 else
683     curvalmax(x,2)=real(delPs);

```

## ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```

684     end
685 end
686 %Rbs boundary
687 j=0;i=0;
688 for z=1:2
689     if z==1
690         Rbs=Rbsmax;
691     else
692         Rbs=Rbsmin;
693     end
694 for x=1:20
695     Ds=Dsmax*(x/20);
696     Lbc=Rbs*Ds;
697     Ntt=((Ds-m1)/(m3*Dt))^n;
698     Dotl=Dt*(Ntt/K1)^(1/n);
699     Lbb=Ds-Dotl;
700     Dctl=Dotl-Dt;
701     anglectl=2*acos((Ds/Dctl)*(1-2*Bc/100))*360/(2*pi);
702     Ftw= anglectl/360-sin(anglectl*2*pi/360)/(2*pi);
703     Swg=pi/4*Ds^2*(angleds/360-sin(angleds*2*pi/360)/(2*pi));
704     Swt=Ntt*Ftw*pi/4*Dt^2;
705     Sw=Swg-Swt;
706     Sm=Lbc*(Lbb+Dctl/Ltpe*(Ltp-Dt));
707     vs=Ms*10^6/(ROs*Sm);
708     Res=ROs*vs*De/MUs;%De en mm
709     [a1,a2,a3,a4,b1,b2,b3,b4]=parametrostabla1(Res,layout(2),tablacoeff1);
710     a=a3/(1+0.14*Res^(a4));
711     b=b3/(1+0.14*Res^(b4));
712     ch=a1*(1.33*Dt/Ltp)^(a)*(ROs*Dt/MUs)^(a2);
713     cp=b1*(1.33*Dt/Ltp)^(b)*(ROs*Dt/MUs)^(b2);
714     Lts=0.1*Ds;
715     if Lts<25
716         Lts=25;
717     end
718     Ntcc=Ds/Lpp*(1-2*(Bc/100));
719     vt=4*10^6*Mt*Ntp/(pi*ROt*Dti^2*Ntt);
720     Ret=ROt*vt*Dti/MUt;
721     if Ret<=2100
722         ac=0.35;
723         Kt=16;
724         mt=-1;
725     else if Ret>10^5
726         ac=0.14;
727         Kt=0.046;
728         mt=-0.2;
729     else
730         ac=0.14;
731         Kt=0.0791;
732         mt=-0.25;
733     end
734 end
735 C1=(2*Kt*Ntp^(3+mt)*Ns*(4*10^6*Mt)^(2+mt)*(m3*Dt)^(n*(2+mt)))/(ROt*MUt^mt*
(MUt/MUtw)^(ac)*pi^(2+mt)*Dti^(5+mt));

```



## ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```

736 C2=1.25*Ntp^3*Ns*(4*10^6*Mt)^2*(m3*Dt)^(2*n)/(ROt*pi^2*Dti^4);
737 Ks4=ch*(MUs/MUsw)^0.14*Prs^(-2/3)*ROs*Cps;%considerando Jtot=1
738 C4=Ks4*(10^6*Ms/ROs)^(1+a2)*(Lbb+Dctl*(Ltp-Dt)/Ltpe)^(1+a2);
739 Ks40=0;
740 C40=0;
741 contador=0;
742 Ntcw=0.8/Lpp*(Ds*(Bc/100));
743 C3=2*0.4475*De^-1.19*Ns*Ms^1.81/(MUs^-0.19*ROs*(MUs/MUsw)^0.14*(1-Dt/Ltp)^1.81);
744 C30=0;
745 syms Lta
746 options=optimset('Display','off');
747 Lta=1000;
748 %bucle de iteración para obtener las variables
749 while contador<100 && (abs((C3-C30)/C3)>0.01 || abs((C4-C40)/C4)>0.01 || abs((Ks4-
Ks40)/Ks4)>0.01);
750 contador=contador+1;C30=C3;C40=C4;Ks40=Ks4;
751 if Ret<=2100
752     C6=1860*kt/Dt*(MUt/MUtw)^0.14*(Cpt*MUt/(kt*10^3))^(1/3)*(4*10^6*Mt)^(1/3)*
(m3*Dt)^(n/3)/(pi*MUt)^(1/3);
753     Lta=fsolve(@(Ltaa) -Ltaa*(Ds-m1)^n+C5*(Ds^(1+a2)*Rbs^(1+a2)/C4+Ltaa^(1/3)*(Ds-
m1)^(n/3)/C6+C7),Lta,options);
754 else if Ret>10000
755     C10=27*kt/Dt*(Cpt*MUt/(10^3*kt))^(1/3)*(MUt/MUtw)^0.14*(4*10^6*Mt)^0.8*
(m3*Dt)^(0.8*n)*Ntp^0.8/(pi*Dti*MUt)^0.8;
756     Lta=C5*(Ds^(1+a2)*Rbs^(1+a2)/C4+(Ds-m1)^(0.8*n)/C10+C7)/(Ds-m1)^n;
757 else
758     C8=0.116*kt/Dt*(MUt/MUtw)^0.14*(Cpt*MUt/(kt*10^3))^(1/3);
759     C9=(4*10^6*Mt)^(2/3)*(m3*Dt)^(2*n/3)/(pi*MUt*Dti)^(2/3);
760     Lta=fsolve(@(Ltaa) -Ltaa*(Ds-m1)^n+C5*(Ds^(1+a2)*Rbs^(1+a2)/C4+1/(C8*(1+
(Dti/Ltaa)^(2/3)))*(C9/(Ds-m1)^(2*n/3)-125)+C7),Lta,options);
761 end
762 end
763 Lts=0.1*Ds;
764 if Lts<25
765     Lts=25;
766 end
767 Ltt=Lta+2*Lts;
768 Nb=(Lta-Lbc*(Li+Lo))/Lbc+1;
769 if isreal(Nb)==0 || real(Ltt)<1
770     delPt=0;
771 break
772 end
773 delPt=C1*Ltt/(Ds-m1)^(n*(2+mt))+C2/(Ds-m1)^(2*n);
774 %CORRECTION FACTORS for heat transfer and pressure drop
775 [Jtot,Rb,Rs,Rl] = correctionfactors(Ftw,Dctl,Lbb,angleds,Dt,Bc,Ds,Dotl,Ntt,Ntcc,
Lpp,Lbc,Res,Nb,Sm);
776 %Shell-side pressure drop, Cálculo Rp y C3
777 if Res>=100 %turbulento
778 Ks1=(Sm/Sw)*((1+0.3*Ntcw)*Rl*Nb*ROs)/((Nb+1)*Ds);
779 Ks2=((Nb-1)/(Nb+1)*Rl+((Ntcc+Ntcw)/(Ntcc*(Nb+1))*Rs))*(1-2*(Bc/100))*(2*Rb*ROs*cp)/
((MUs/MUsw)^-0.14*Lpp);
780 Rp=-b2/(Ks1/(Ks2*vs^b2)+1);
781 Ks3=Ks1*vs^Rp+Ks2*vs^(Rp+b2);

```

## ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```

782 else%laminar
783 k1=(26*10^3*Nb*Rl*MUs)/((Nb+1)*Ds*sqrt(Sw/Sm))*(Ntcw/(Ltp-Dt)+Lbc/Dw^2);%que es Dw
784 k2=Nb*Rl*ROs/((Nb+1)*Ds)*(Sm/Sw);
785 k3=((Nb-1)*Rl/(Nb+1)+(Ntcc+Ntcw)*Rs/(Ntcc*(Nb+1)))*(1-2*(Bc/100))*(2*Rb*ROs*cp)/
((MUs/MUsw)^-0.14*Lpp);
786 Rp=2-(k1+2*k2*vs+k3*(2+b2)*vs^(1+b2))/(k1+k2*vs+k3*vs^(1+b2));
787 Ks3=(k1*vs^-1+k2+k3*vs^b2)*vs^Rp;%B15 no seguro si es exponente!!!
788 end
789 C3=((Nb+1)/((Nb-1)+(Li+Lo)))*(Ks3*4*Ns*Ms^(2-Rp))/(ROs*10^-6*(Lbb+Dctl*(Ltp-Dt)
/Ltpe))^(2-Rp);
790 Prs=Cps*MUs/(10^3*ks);
791 Prt=Cpt*MUt/(10^3*kt);
792 Ks4=ch*(MUs/MUsw)^0.14*Prs^(-2/3)*ROs*Cps*Jtot;
793 C4=Ks4*(10^6*Ms/ROs)^(1+a2)*(Lbb+Dctl*(Ltp-Dt)/Ltpe)^(1+a2);
794 hs=C4/(Rbs^(1+a2)*Ds^(1+a2));
795 if Ret<=2100
796 ht=1860*kt/Dti*(Ret*Prt*Dti/Lta)^(1/3)*(MUt/MUtw)^(0.14);
797 else if Ret>10000
798     ht=27*kt/Dti*Ret^0.8*Prt^(1/3)*(MUt/MUtw)^(0.14);
799     else
800     ht=116*(Ret^(2/3)-125)*Prt^(1/3)*(1+Dti/Lta)^(2/3)*(MUt/MUtw)^(0.14);
801     end
802 end
803 if isnan(hs)==0
804 Tw=Ttav+(Tsav-Ttav)/(1+ht/hs);
805 [MUt,MUs,MUtw,MUsw] = viscosidades(MUtin,MUsin,MUtout,MUsout,Tw,Ttin,Ttout,Tsin,
Tsout,ROt,ROs);
806 end
807 end
808 delPs=C3*Lta/(Rbs^(3-Rp)*Ds^(2-Rp));
809 if z==1
810     if delPt~=0
811         i=i+1;
812         curvarbsmax(i,1)=real(delPt);
813         curvarbsmax(i,2)=real(delPs);
814     end
815 else
816     if delPt~=0
817         j=j+1;
818         curvarbsmin(j,1)=real(delPt);
819         curvarbsmin(j,2)=real(delPs);
820     end
821 end
822 end
823 end
824 f=figure(1);
825 plot(curvavtmax(:,1),curvavtmax(:,2),curvavtmin(:,1),curvavtmin(:,2),'-.','
curvavsmx(:,1),curvavsmx(:,2),'-.','curvavsmn(:,1),curvavsmn(:,2),curvadsmax(:,1),
curvadsmax(:,2),'-.','curvalmax(:,1),curvalmax(:,2),curvarbsmax(:,1),curvarbsmax(:,2),
curvarbsmin(:,1),curvarbsmin(:,2),'-.',');
826 axis([0,delPtmax,0,delPsmax]);
827 legend
('vtmax','vtmin','vsmx','vsmin','Dsmax','Lmax','Rbsmax','Rbsmin','Location','NorthEast

```

---

ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

---

```
Outside');  
828 xlabel('Pérdida de carga en los tubos (Pa)')  
829 ylabel('Pérdida de carga en la carcasa (Pa)')  
830 h=getframe(gcf);set(gcf,'Visible','off')  
831 imwrite(h.cdata,'grafica.png');
```

## ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```

1 %Obtención de las dimensiones una vez conocida la solución
2 %VARIABLES DE ENTRADA
3 %Bc es el corte del deflector
4 %Cps y Cpt son los calores específicos de ambos fluidos
5 %Dsmax es el diámetro máximo de la carcasa
6 %Lmax es la longitud máxima de los tubos
7 %Li y Lo son las separaciones de los deflectores a la entrada y a la salida
8 %MUsin, MUsout, MUTin y MUTout son las viscosidades de los fluidos a la
9 %temperatura de entrada y de salida
10 %Ms y Mt son los caudales máscicos para ambos fluidos
11 %ROs y ROt son las densidades de ambos fluidos
12 %Ntp son el número de pasos por los tubos
13 %Rfs y Rft son las resistencias de ensuciamiento para ambos fluidos
14 %Tsin, Tsout, Ttin y Ttout son las temperaturas de entrada y salida de los
15 %fluidos
16 %angle y forma determinan el layout de los tubos
17 %bundletype es el tipo de cabezal
18 %delPsmay y delPtmax son las pérdidas de carga máximas admisibles en
19 %carcasa y tubos respectivamente
20 %ks y kt son las conductividades térmicas de los fluidos
21 %kw es la conductividad térmica del material de los tubos
22 %vsmay, vsmin, vtmax y vtmin son las velocidades límites para ambos fluidos
23 %punto es el número que indica qué intersección de la gráfica se quiere
24 %obtener
25 %VARIABLES INTERNAS DEL PROGRAMA
26 %Rbsmay y Rbsmin son la relación entre la separacion de los deflectores y
27 %el diámetro de la carcasa máxima y mínima
28 %Dt y Dti son el diámetro externo e interno de los tubos, respectivamente
29 %Ltp es la separación entre los tubos (tube pitch)
30 %Ns es el número de pasos por la carcasa
31 %SALIDA
32 %Se obtienen los siguientes parámetros del punto seleccionado
33 %delPt y delPs son la pérdida de carga en los tubos y en la carcasa,
34 %respectivamente
35 %A es el área en la que se produce intercambio de calor
36 %TAC es el coste total anualizado del intercambiador
37 %Ltt es la longitud de los tubos
38 %Ds es el diámetro de la carcasa
39 %Rbs es la relación entre la separacion de los deflectores y el diámetro de
40 %la carcasa
41 %vs y vt son las velocidades de los fluidos en la carcasa y en los tubos,
42 %respectivamente
43 load punto
44 load variables
45 if Ttin>Tsin
46     Thi=Ttin;
47     Tho=Tto;
48     Tci=Tsin;
49     Tco=Tsout;
50 else
51     Thi=Tsin;
52     Tho=Tsout;
53     Tci=Ttin;

```

ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```

54     Tco=Ttout;
55 end
56 Rbsmax=1;
57 Rbsmin=0.2;
58 Dt=19.1;
59 Dti=15.4;
60 Ltp=1.25*Dt;
61 layout=[forma angle];
62 Ns=1;
63 S=(Tco-Tci)/(Thi-Tci);
64 R=(Thi-Tho)/(Tco-Tci);
65 P=(1-((R*S-1)/(S-1))^(1/Ntp))/(R-((R*S-1)/(S-1))^(1/Ntp));
66 F=(sqrt(R^2+1)*log((1-P)/(1-R*P)))/((R-1)*log((2/P-1-R+sqrt(R^2+1))/(2/P-R-1-sqrt(
(R^2+1)))));
67 while F<0.8
68     Ntp=Ntp+1;
69 P=(1-((R*S-1)/(S-1))^(1/Ntp))/(R-((R*S-1)/(S-1))^(1/Ntp));
70 F=(sqrt(R^2+1)*log((1-P)/(1-R*P)))/((R-1)*log((2/P-1-R+sqrt(R^2+1))/(2/P-R-1-sqrt(
(R^2+1)))));
71 end
72 LMTD=((Thi-Tco)-(Tho-Tci))/log((Thi-Tco)/(Tho-Tci));
73 Q=Mt*abs(Ttin-Ttout)*Cpt;
74 if layout(1)==2
75     De=4*(Ltp^2-pi*Dt^2/4)/(pi*Dt);
76 else
77     De=4*(sqrt(3)*Ltp^2/4-pi*Dt^2/8)/(pi*Dt/2);
78 end
79 %TABLA A1 columnas (a1 a2 a3 a4 b1 b2 b3 b4) filas 30° Reynodls(10^5-10^4,10^4-
10^3,10^3-10^2,
80 %10^2-10,<10) 45°(10^5...) 90°(10^5...)
81 tablacoeff1=[0.321 0.321 0.593 1.36 1.4 0.37 0.37 0.73 0.498 1.55 0.37 0.107 0.408
0.9 0.97;-0.388 -0.388 -0.477 -0.657 -0.667 -0.396 -0.396 -0.5 -0.656 -0.667 -0.395
-0.266 -0.46 -0.631 -0.667;1.45 1.45 1.45 1.45 1.45 1.93 1.93 1.93 1.93 1.93 1.187
1.187 1.187 1.187;0.519 0.519 0.519 0.519 0.519 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.37 0.37
0.37 0.37 0.37; 0.372 0.486 4.57 45.1 48 0.303 0.333 3.5 26.2 32 0.391 0.0815 6.09 32.1
35; -0.123 -0.152 -0.476 -0.973 -1 -0.126 -0.136 -0.476 -0.913 -1 -0.148 0.022 -0.602
-0.963 -1;7 7 7 7 7 6.59 6.59 6.59 6.59 6.59 6.3 6.3 6.3 6.3 6.3; 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5
0.52 0.52 0.52 0.52 0.52 0.378 0.378 0.378 0.378 0.378]';
82 %TABLA 1
83 tablacoeffm=[8 39 44 87;0.01 0 0.025 0.007]';
84 %TABLA 2
85 tablacoeff2=[0.319 0.249 0.175 0.0743 0.0365;0.215 0.156 0.158 0.0402 0.0331;2.142
2.207 2.285 2.499 2.675;2.207 2.291 2.263 2.617 2.643]';
86 [m1,m2]=parametrosm(tablacoeffm,bundletype);
87 [K1,n]=parametrostabla2(layout,tablacoeff2,Ntp);
88 %Cálculos geometría
89 if layout(2)==2
90     Ltpe=0.707*Ltp;
91     Lpp=0.707*Ltp;
92 else if layout(2)==1
93     Ltpe=Ltp;
94     Lpp=0.866*Ltp;
95 else

```

ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```

96         Lpp=Ltp;
97         Ltpe=Ltp;
98     end
99 end
100 angleds=2*acos(1-2*(Bc/100))*360/(2*pi);
101 m3=(m2+1)/K1^(1/n);
102 MUt=MUtin;MUs=MUsin;MUtw=MUtin;MUsw=MUsin;%para empezar iteraciones
103 C5=Q*10^6*(m3*Dt)^n/(pi*Dt*Ns*F*LMTD);
104 C7=Dt*Rft/Dti+Dt*log(Dt/Dti)/(2*10^3*kw)+Rfs;
105 Prs=Cps*MUs/(10^3*ks);
106 Prt=Cpt*MUt/(10^3*kt);
107 Ttav=(Ttin+Ttout)/2;Tsav=(Tsin+Tsout)/2;
108 %coste
109 Ca=30000;Cb=750;c=0.81;Ce=2000;Cf=5;g=0.68;Cpow=0.00005;H=8000;Af=0.322;rend=0.7;
110 %Rbsmin vtmin
111 if punto==1;
112 Rbs=Rbsmin;
113 vt=vtmin;
114 Ret=ROt*vt*Dti/MUt;
115 Ntt=fix(((4*10^6*Mt*Ntp)/(pi*vt*ROt*Dti^2)/Ntp)+1)*Ntp;
116 Ds=m1+m3*Dt*(Ntt)^(1/n);
117 Lts=0.1*Dts;
118 if Lts<25
119     Lts=25;
120 end
121 Dotl=Dt*(Ntt/K1)^(1/n);
122 Lbb=Ds-Dotl;
123 Dctl=Dotl-Dt;
124 anglectl=2*acos((Ds/Dctl)*(1-2*Bc/100))*360/(2*pi);
125 Ftw= anglectl/360-sin(anglectl*2*pi/360)/(2*pi);
126 if Ret<=2100
127     ac=0.35;
128     Kt=16;
129     mt=-1;
130 else if Ret>10^5
131     ac=0.14;
132     Kt=0.046;
133     mt=-0.2;
134     else
135     ac=0.14;
136     Kt=0.0791;
137     mt=-0.25;
138     end
139 end
140 C1=(2*Kt*Ntp^(3+mt)*Ns*(4*10^6*Mt)^(2+mt)*(m3*Dt)^(n*(2+mt)))/(ROt*MUt^mt*
(MUt/MUtw)^(ac)*pi^(2+mt)*Dti^(5+mt));
141 C2=1.25*Ntp^3*Ns*(4*10^6*Mt)^2*(m3*Dt)^(2*n)/(ROt*pi^2*Dti^4);
142 Swg=pi/4*Dts^2*(angleds/360-sin(angleds*2*pi/360)/(2*pi));
143 Swt=Ntt*Ftw*pi/4*Dt^2;
144 Sw=Swg-Swt;
145 Lbc=Rbs*Dts;
146 Sm=Lbc*(Lbb+Dctl/Ltpe*(Ltp-Dt));
147 vs=Ms*10^6/(ROs*Sm);

```

# ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```

148 Res=ROs*vs*De/MUs;%De en mm
149 [a1,a2,a3,a4,b1,b2,b3,b4]=parametrostablal(Res,layout(2),tablacoeff1);
150 a=a3/(1+0.14*Res^(a4));
151 b=b3/(1+0.14*Res^(b4));
152 ch=a1*(1.33*Dt/Ltp)^(a)*(ROs*Dt/MUs)^(a2);
153 cp=b1*(1.33*Dt/Ltp)^(b)*(ROs*Dt/MUs)^(b2);
154 Ntcc=Ds/Lpp*(1-2*(Bc/100));
155 Ntcw=0.8/Lpp*(Ds*(Bc/100));
156 Nb=5;Nb0=0;
157 while abs((Nb-Nb0)/Nb)>0.01
158 Nb0=Nb;
159 [Jtot,Rb,Rs,Rl] = correctionfactors(Ftw,Dctl,Lbb,angleds,Dt,Bc,Ds,Dotl,Ntt,Ntcc,
Lpp,Lbc,Res,Nb,Sm);
160 %Shell-side pressure drop, Cálculo Rp y C3
161 if Res>=2100 %turbulento
162 Ks1=(Sm/Sw)*((1+0.3*Ntcw)*Rl*Nb*ROs)/((Nb+1)*Ds);
163 Ks2=((Nb-1)/(Nb+1)*Rl+(Ntcc+Ntcw)/(Ntcc*(Nb+1))*Rs)*(1-2*(Bc/100))*(2*Rb*ROs*cp)
/((MUs/MUsw)^-0.14*Lpp);
164 Rp=-b2/(Ks1/(Ks2*vs^b2)+1);
165 Ks3=Ks1*vs^Rp+Ks2*vs^(Rp+b2);
166 else%laminar
167 Ntw=Ntt*Ftw;
168 Dw=4*Sw/(pi*Dt*Ntw+Ds*angleds/2);
169 k1=(26*10^3*Nb*Rl*MUs)/((Nb+1)*Ds*sqrt(Sw/Sm))*(Ntcw/(Ltp-Dt)+Lbc/Dw^2);
170 k2=Nb*Rl*ROs/((Nb+1)*Ds)*(Sm/Sw);
171 k3=((Nb-1)*Rl/(Nb+1)+(Ntcc+Ntcw)*Rs/(Ntcc*(Nb+1)))*(1-2*(Bc/100))*(2*Rb*ROs*cp)
/((MUs/MUsw)^-0.14*Lpp);
172 Rp=2-(k1+2*k2*vs+k3*(2+b2)*vs^(1+b2))/(k1+k2*vs+k3*vs^(1+b2));
173 Ks3=(k1*vs^-1+k2+k3*vs^b2)*vs^Rp;
174 end
175 C3=((Nb+1)/((Nb-1)+(Li+Lo)))*(Ks3^4*Ns*Ms^(2-Rp))/(ROs*10^-6*(Lbb+Dctl*(Ltp-Dt)
/Ltpe))^(2-Rp);
176 Ks4=ch*(MUs/MUsw)^0.14*Prs^(-2/3)*ROs*Cps*Jtot;
177 C4=Ks4*(10^6*Ms/ROs)^(1+a2)*(Lbb+Dctl*(Ltp-Dt)/Ltpe)^(1+a2);
178 syms Lta
179 options=optimset('Display','off');
180 Lta=1000;
181 if Ret<=2100
182 C6=1860*kt/Dt*(MUt/MUtw)^0.14*(Cpt*MUt/(kt*10^3))^(1/3)*(4*10^6*Mt)^(1/3)*
(m3*Dt)^(n/3)/(pi*MUt)^(1/3);
183 m1=(n/3)/C6+C7,Lta,options);
184 else if Ret>10000
185 C10=27*kt/Dt*(Cpt*MUt/(10^3*kt))^(1/3)*(MUt/MUtw)^0.14*(4*10^6*Mt)^0.8*
(m3*Dt)^(0.8*n)*Ntp^0.8/(pi*Dti*MUt)^0.8;
186 Lta=C5*(Ds^(1+a2)*Rbs^(1+a2)/C4+(Ds-m1)^(0.8*n)/C10+C7)/(Ds-m1)^n;
187 else
188 C8=0.116*kt/Dt*(MUt/MUtw)^0.14*(Cpt*MUt/(kt*10^3))^(1/3);
189 C9=(4*10^6*Mt)^(2/3)*(m3*Dt)^(2*n/3)/(pi*MUt*Dti)^(2/3);
190 Lta=fsolve(@ (Ltaa) -Ltaa*(Ds-m1)^n+C5*(Ds^(1+a2)*Rbs^(1+a2)/C4+1/(C8*(1+
Dti/Ltaa)^(2/3))* (C9/(Ds-m1)^(2*n/3)-125)+C7)),Lta,options);
191 end
192 end

```

# ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```

193 hs=C4/(Rbs^(1+a2)*Ds^(1+a2));
194 if Ret<=2100
195 ht=1860*kt/Dti*(Ret*Prt*Dti/Lta)^(1/3)*(MUT/MUtw)^(0.14);
196 else if Ret>10000
197     ht=27*kt/Dti*Ret^0.8*Prt^(1/3)*(MUT/MUtw)^(0.14);
198 else
199     ht=116*(Ret^(2/3)-125)*Prt^(1/3)*(1+Dti/Lta)^(2/3)*(MUT/MUtw)^(0.14);
200 end
201 end
202 Tw=Ttav+(Tsav-Ttav)/(1+ht/hs);
203 [MUT,MUS,MUtw,MUsw] = viscosidades(MUTin,MUSin,MUTout,MUswin,Tw,Ttin,Ttout,Tsin,
Tsout,ROt,ROs);
204 Prs=Cps*MUS/(10^3*ks);
205 Prt=Cpt*MUT/(10^3*kt);
206 Ltt=Lta+2*Lts;
207 Nb=(Lta-Lbc*(Li+Lo))/Lbc+1;
208 end
209 delPs=C3*Lta/(Rbs^(3-Rp)*Ds^(2-Rp));
210 delPt=C1*Ltt/(Ds-m1)^(n*(2+mt))+C2/(Ds-m1)^(2*n);
211 A=pi*Dt*Lta*Ntt*Ns*10^-6;
212 TAC=Af*(Ca+Cb*A^c+Ce+Cf*(Ms*delPs/ROs)^g+Ce+Cf*(Mt*delPt/ROt)^g)+Cpow*H/rend*
(Ms*delPs/ROs+Mt*delPt/ROt);
213 %Para Rbs y Dsmax
214 else if punto==2
215 Rbs=Rbsmin;
216 Ds=Dsmax;
217 Lbc=Rbs*Ds;
218 Ntt=((Ds-m1)/(m3*Dt))^n;
219 Dotl=Dt*(Ntt/K1)^(1/n);
220 Lbb=Ds-Dotl;
221 Dctl=Dotl-Dt;
222 anglectl=2*acos((Ds/Dctl)*(1-2*Bc/100))*360/(2*pi);
223 Ftw= anglectl/360-sin(anglectl*2*pi/360)/(2*pi);
224 Swg=pi/4*Dt^2*(angleds/360-sin(angleds*2*pi/360)/(2*pi));
225 Swt=Ntt*Ftw*pi/4*Dt^2;
226 Sw=Swg-Swt;
227 Sm=Lbc*(Lbb+Dctl/Ltpe*(Ltp-Dt));
228 vs=Ms*10^6/(ROs*Sm);
229 Res=ROs*vs*De/MUS;
230 [a1,a2,a3,a4,b1,b2,b3,b4]=parametrostablal(Res,layout(2),tablacoeff1);

232 b=b3/(1+0.14*Res^(b4));
233 ch=a1*(1.33*Dt/Ltp)^(a)*(ROs*Dt/MUS)^(a2);
234 cp=b1*(1.33*Dt/Ltp)^(b)*(ROs*Dt/MUS)^(b2);
235 Lts=0.1*Ds;
236 if Lts<25
237     Lts=25;
238 end
239 Ntcc=Ds/Lpp*(1-2*(Bc/100));
240 vt=4*10^6*Mt*Ntp/(pi*ROt*Dti^2*Ntt);
241 Ret=ROt*vt*Dti/MUT;
242 if Ret<=2100
243     ac=0.35;

```



ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```

244     Kt=16;
245     mt=-1;
246 else if Ret>10^5
247     ac=0.14;
248     Kt=0.046;
249     mt=-0.2;
250 else
251     ac=0.14;
252     Kt=0.0791;
253     mt=-0.25;
254 end
255 end
256 C1=(2*Kt*Ntp^(3+mt)*Ns*(4*10^6*Mt)^(2+mt)*(m3*Dt)^(n*(2+mt)))/(ROt*MUt^mt*
(MUt/MUtw)^(ac)*pi^(2+mt)*Dti^(5+mt));
257 C2=1.25*Ntp^3*Ns*(4*10^6*Mt)^2*(m3*Dt)^(2*n)/(ROt*pi^2*Dti^4);
258 Ntcw=0.8/Lpp*(Ds*(Bc/100));
259 Nb=5;Nb0=0;
260 while abs((Nb-Nb0)/Nb)>0.01
261     Nb0=Nb;
262 [Jtot,Rb,Rs,Rl] = correctionfactors(Ftw,Dctl,Lbb,angleds,Dt,Bc,Ds,Dotl,Ntt,Ntcc,
Lpp,Lbc,Res,Nb,Sm);
263 Ks4=ch*(MUs/MUsw)^0.14*Prs^(-2/3)*ROs*Cps*Jtot;
264 C4=Ks4*(10^6*Ms/ROs)^(1+a2)*(Lbb+Dctl*(Ltp-Dt)/Ltpe)^-(1+a2);
265 syms Lta
266 options=optimset('Display','off');
267 Lta=1000;
268 if Ret<=2100
269     C6=1860*kt/Dt*(MUt/MUtw)^0.14*(Cpt*MUt/(kt*10^3))^(1/3)*(4*10^6*Mt)^(1/3)*
(m3*Dt)^(n/3)/(pi*MUt)^(1/3);
270     Lta=fsolve(@(Ltaa) -Ltaa*(Ds-m1)^n+C5*(Ds^(1+a2)*Rbs^(1+a2)/C4+Ltaa^(1/3)*(Ds-
m1)^(n/3)/C6+C7),Lta,options);
271 else if Ret>10000
272     C10=27*kt/Dt*(Cpt*MUt/(10^3*kt))^(1/3)*(MUt/MUtw)^0.14*(4*10^6*Mt)^0.8*
(m3*Dt)^(0.8*n)*Ntp^0.8/(pi*Dti*MUt)^0.8;
273     Lta=C5*(Ds^(1+a2)*Rbs^(1+a2)/C4+(Ds-m1)^(0.8*n)/C10+C7)/(Ds-m1)^n;
274 else
275     C8=0.116*kt/Dt*(MUt/MUtw)^0.14*(Cpt*MUt/(kt*10^3))^(1/3);
276     C9=(4*10^6*Mt)^(2/3)*(m3*Dt)^(2*n/3)/(pi*MUt*Dti)^(2/3);
277     Lta=fsolve(@(Ltaa) -Ltaa*(Ds-m1)^n+C5*(Ds^(1+a2)*Rbs^(1+a2)/C4+1/(C8*(1+
Dti/Ltaa)^(2/3))*(C9/(Ds-m1)^(2*n/3)-125)+C7),Lta,options);
278 end
279 end
280 hs=C4/(Rbs^(1+a2)*Ds^(1+a2));
281 if Ret<=2100
282     ht=1860*kt/Dti*(Ret*Prt*Dti/Lta)^(1/3)*(MUt/MUtw)^(0.14);
283 else if Ret>10000
284     ht=27*kt/Dti*Ret^0.8*Prt^(1/3)*(MUt/MUtw)^(0.14);
285 else
286     ht=116*(Ret^(2/3)-125)*Prt^(1/3)*(1+Dti/Lta)^(2/3)*(MUt/MUtw)^(0.14);
287 end
288 end
289 Tw=Ttav+(Tsav-Ttav)/(1+ht/hs);
290 [MUt,MUs,MUtw,MUsw] = viscosidades(MUtin,MUusin,MUtout,MUsout,Tw,Ttin,Ttout,Tsin,

```

ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```

Tsout,ROt,ROs);
291 Prs=Cps*MUs/(10^3*ks);
292 Prt=Cpt*MUt/(10^3*kt);
293 Ltt=Lta+2*Lts;
294 Nb=(Lta-Lbc*(Li+Lo))/Lbc+1;
295 end
296 %Shell-side pressure drop, Cálculo Rp y C3
297 if Res>=2100 %turbulento
298 Ks1=(Sm/Sw)*((1+0.3*Ntcw)*Rl*Nb*ROs)/((Nb+1)*Ds);
299 Ks2=((Nb-1)/(Nb+1)*Rl+((Ntcc+Ntcw)/(Ntcc*(Nb+1))*Rs))*(1-2*(Bc/100))*(2*Rb*ROs*cp)
/((MUs/MUsw)^-0.14*Lpp);
300 Rp=-b2/(Ks1/(Ks2*vs^b2)+1);
301 Ks3=Ks1*vs^Rp+Ks2*vs^(Rp+b2);
302 else%laminar
303 k1=(26*10^3*Nb*Rl*MUs)/((Nb+1)*Ds*sqrt(Sw/Sm))*Ntcw/(Ltp-Dt)+Lbc/Dw^2);%que es Dw
304 k2=Nb*Rl*ROs/((Nb+1)*Ds)*(Sm/Sw);
305 k3=((Nb-1)*Rl/(Nb+1)+(Ntcc+Ntcw)*Rs/(Ntcc*(Nb+1)))*(1-2*(Bc/100))*(2*Rb*ROs*cp)/
((MUs/MUsw)^-0.14*Lpp);
306 Rp=2-(k1+2*k2*vs+k3*(2+b2)*vs^(1+b2))/(k1+k2*vs+k3*vs^(1+b2));
307 Ks3=(k1*vs^-1+k2+k3*vs^b2)*vs^Rp;%B15 no seguro si es exponente!!!
308 end
309 C3=((Nb+1)/((Nb-1)+(Li+Lo)))*(Ks3^4*Ns*Ms^(2-Rp))/(ROs*10^-6*(Lbb+Dctl*(Ltp-Dt)
/Ltpe))^(2-Rp);
310 hs=C4/(Rbs^(1+a2)*Ds^(1+a2));
311 delPs=C3*Lta/(Rbs^(3-Rp)*Ds^(2-Rp));
312 delPt=C1*Ltt/(Ds-m1)^(n*(2+mt))+C2/(Ds-m1)^(2*n);
313 A=pi*Dt*Lta*Ntt*Ns*10^-6;
314 TAC=Af*(Ca+Cb*A^c+Ce+Cf*(Ms*delPs/ROs)^g+Ce+Cf*(Mt*delPt/ROt)^g)+Cpow*H/rend*
(Ms*delPs/ROs+Mt*delPt/ROt);
315 %vtmin vsmax
316 else if punto==3
317 vt=vtmin;
318 vs=vsmax;
319 Ret=ROt*vt*Dti/MUt;
320 Ntt=fix(((4*10^6*Mt*Ntp)/(pi*vt*ROt*Dti^2)/Ntp)+1)*Ntp;
321 Ds=m1+m3*Dt*(Ntt)^(1/n);
322 Lts=0.1*Ds;
323 if Lts<25
324     Lts=25;
325 end
326
327 Lbb=Ds-Dot1;
328 Dctl=Dot1-Dt;
329 Lbc=10^6*Ms/(vs*ROs*(Lbb+Dctl/Ltpe*(Ltp-Dt)));
330 Rbs=Lbc/Ds;
331 anglectl=2*acos((Ds/Dctl)*(1-2*Bc/100))*360/(2*pi);
332 Ftw= anglectl/360-sin(anglectl*2*pi/360)/(2*pi);
333 if Ret<=2100
334     ac=0.35;
335     Kt=16;
336     mt=-1;
337 else if Ret>10^5
338     ac=0.14;

```

ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```

339     Kt=0.046;
340     mt=-0.2;
341     else
342         ac=0.14;
343         Kt=0.0791;
344         mt=-0.25;
345     end
346 end
347 Ntcw=0.8/Lpp*(Ds*(Bc/100));
348 Ntcc=Ds/Lpp*(1-2*(Bc/100));
349 C1=(2*Kt*Ntp^(3+mt)*Ns*(4*10^6*Mt)^(2+mt)*(m3*Dt)^(n*(2+mt)))/(ROt*MUt^mt*
(MUt/MUtw)^(ac)*pi^(2+mt)*Dti^(5+mt));
350 C2=1.25*Ntp^3*Ns*(4*10^6*Mt)^2*(m3*Dt)^(2*n)/(ROt*pi^2*Dti^4);
351 Swg=pi/4*Dc^2*(angleds/360-sin(angleds*2*pi/360)/(2*pi));
352 Swt=Ntt*Ftw*pi/4*Dc^2;
353 Sw=Swg-Swt;
354 Res=ROs*vs*De/MUs;
355 [a1,a2,a3,a4,b1,b2,b3,b4]=parametrostablal(Res,layout(2),tablacoeff1);
356 a=a3/(1+0.14*Res^(a4));
357 b=b3/(1+0.14*Res^(b4));
358 ch=a1*(1.33*Dt/Ltp)^(a)*(ROs*Dt/MUs)^(a2);
359 cp=b1*(1.33*Dt/Ltp)^(b)*(ROs*Dt/MUs)^(b2);
360 Sm=Lbc*(Lbb+Dctl/Ltpe*(Ltp-Dt));
361 Nb=5;Nb0=0;
362 while abs((Nb-Nb0)/Nb)>0.01
363     Nb0=Nb;
364 %CORRECTION FACTORS for heat transfer and pressure drop
365 [Jtot,Rb,Rs,Rl] = correctionfactors(Ftw,Dctl,Lbb,angleds,Dt,Bc,Ds,Dctl,Ntt,Ntcc,
Lpp,Lbc,Res,Nb,Sm);
366 Ks4=ch*(MUs/MUsw)^0.14*Prs^(-2/3)*ROs*Cps*Jtot;
367 C4=Ks4*(10^6*Ms/ROs)^(1+a2)*(Lbb+Dctl*(Ltp-Dt)/Ltpe)^(1+a2);
368 syms Ltaa;
369 Lta=1000;
370 options=optimset('Display','off');
371 if Ret<=2100
372     C6=1860*kt/Dt*(MUt/MUtw)^0.14*(Cpt*MUt/(kt*10^3))^(1/3)*(4*10^6*Mt)^(1/3)*
(m3*Dt)^(n/3)/(pi*MUt)^(1/3);
373     Lta=fsolve(@ (Ltaa) -Ltaa*(Ds-m1)^n+C5*(Ds^(1+a2)*Rbs^(1+a2)/C4+Ltaa^(1/3)*(Ds-
m1)^(n/3)/C6+C7),Lta,options);
374 else if Ret>10000
375     C10=27*kt/Dt*(Cpt*MUt/(10^3*kt))^(1/3)*(MUt/MUtw)^0.14*(4*10^6*Mt)^0.8*
(m3*Dt)^(0.8*n)*Ntp^0.8/(pi*Dti*MUt)^0.8;
376     Lta=C5*(Ds^(1+a2)*Rbs^(1+a2)/C4+(Ds-m1)^(0.8*n)/C10+C7)/(Ds-m1)^n;
377 else
378     C8=0.116*kt/Dt*(MUt/MUtw)^0.14*(Cpt*MUt/(kt*10^3))^(1/3);
379     C9=(4*10^6*Mt)^(2/3)*(m3*Dt)^(2*n/3)/(pi*MUt*Dti)^(2/3);
380     Lta=fsolve(@ (Ltaa) -Ltaa/(Ds-m1)^n+C5*(Ds^(1+a2)*Rbs^(1+a2)/C4+1/(C8*(1+
Dti/Ltaa)^(2/3))*(C9/(Ds-m1)^(2*n/3)-125)+C7),Lta,options);
381     end
382 end
383 hs=C4/(Rbs^(1+a2)*Ds^(1+a2));
384 if Ret<=2100
385     ht=1860*kt/Dti*(Ret*Prt*Dti/Lta)^(1/3)*(MUt/MUtw)^(0.14);

```

# ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```

386 else if Ret>10000
387     ht=27*kt/Dti*Ret^0.8*Prt^(1/3)*(MUT/MUtw)^(0.14);
388 else
389     ht=116*(Ret^(2/3)-125)*Prt^(1/3)*(1+Dti/Lta)^(2/3)*(MUT/MUtw)^(0.14);
390 end
391 end
392 Tw=Ttav+(Tsav-Ttav)/(1+ht/hs);
393 [MUT,MUS,MUtw,MUsw] = viscosidades(MUtin,MUtin,MUtin,MUtin,Tw,Ttin,Ttout,Tsin,
Tsout,ROt,ROs);
394 Prs=Cps*MUS/(10^3*ks);
395 Prt=Cpt*MUT/(10^3*kt);
396 Ltt=Lta+2*Lts;
397 Nb=(Lta-Lbc*(Li+Lo))/Lbc+1;
398 end
399 if Res>=2100 %turbulento
400 Ks1=(Sm/Sw)*((1+0.3*Ntcw)*Rl*Nb*ROs)/((Nb+1)*Ds);
401 Ks2=((Nb-1)/(Nb+1)*Rl+(Ntcc+Ntcw)/(Ntcc*(Nb+1))*Rs)*(1-2*(Bc/100))*(2*Rb*ROs*cp)
/((MUS/MUsw)^-0.14*Lpp);
402 Rp=-b2/(Ks1/(Ks2*vs^b2)+1);
403 Ks3=Ks1*vs^Rp+Ks2*vs^(Rp+b2);
404 else%laminar
405 k1=(26*10^3*Nb*Rl*MUS)/((Nb+1)*Ds*sqrt(Sw/Sm))*Ntcw/(Ltp-Dt)+Lbc/Dw^2;%que es Dw
406 k2=Nb*Rl*ROs/((Nb+1)*Ds)*(Sm/Sw);
407 k3=((Nb-1)*Rl/(Nb+1)+(Ntcc+Ntcw)*Rs/(Ntcc*(Nb+1)))*(1-2*(Bc/100))*(2*Rb*ROs*cp)
/((MUS/MUsw)^-0.14*Lpp);
408 Rp=2-(k1+2*k2*vs+k3*(2+b2)*vs^(1+b2))/(k1+k2*vs+k3*vs^(1+b2));
409 Ks3=(k1*vs^-1+k2+k3*vs^b2)*vs^Rp;%B15 no seguro si es exponente!!!
410 end
411 C3=((Nb+1)/((Nb-1)+(Li+Lo)))*(Ks3^4*Ns*Ms^(2-Rp))/(ROs*10^-6*(Lbb+Dctl*(Ltp-Dt)
/Ltpe))^(2-Rp);
412 hs=C4/(Rbs^(1+a2)*Ds^(1+a2));
413 delPs=C3*Lta/(Rbs^(3-Rp)*Ds^(2-Rp));
414 delPt=C1*Ltt/(Ds-m1)^(n*(2+mt))+C2/(Ds-m1)^(2*n);
415 A=pi*Dt*Lta*Ntt*Ns*10^-6;
416 TAC=Af*(Ca+Cb*A^c+Ce+Cf*(Ms*delPs/ROs)^g+Ce+Cf*(Mt*delPt/ROt)^g)+Cpow*H/rend*
(Ms*delPs/ROs+Mt*delPt/ROt);
417 %vsmax Dsmax
418 else if punto==4
419 vs=vsmax;
420 Ds=Dsmax;
421 Res=ROs*vs*De/MUS;
422 [a1,a2,a3,a4,b1,b2,b3,b4]=parametrostablal(Res,layout(2),tablacoeff1);
423 a=a3/(1+0.14*Res^(a4));
424 b=b3/(1+0.14*Res^(b4));
425 ch=a1*(1.33*Dt/Ltp)^(a)*(ROs*Dt/MUS)^(a2);
426 cp=b1*(1.33*Dt/Ltp)^(b)*(ROs*Dt/MUS)^(b2);
427 Ntt=((Ds-m1)/(m3*Dt))^n;
428 Dotl=Dt*(Ntt/K1)^(1/n);
429 Lbb=Ds-Dotl;
430 Dctl=Dotl-Dt;
431 Lbc=10^6*Ms/(vs*ROs*(Lbb+Dctl/Ltpe*(Ltp-Dt)));
432 Rbs=Lbc/Ds;
433 anglectl=2*acos((Ds/Dctl)*(1-2*Bc/100))*360/(2*pi);

```

# ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```

434 Ftw= anglectl/360-sin(anglectl*2*pi/360)/(2*pi);
435 Swg=pi/4*Ds^2*(angleds/360-sin(angleds*2*pi/360)/(2*pi));
436 Swt=Ntt*Ftw*pi/4*Dt^2;
437 Sw=Swg-Swt;
438 Ntcc=Ds/Lpp*(1-2*(Bc/100));
439 Ntcw=0.8/Lpp*(Ds*(Bc/100));
440 vt=4*10^6*Mt*Ntp/(pi*ROt*Dti^2*Ntt);
441 Ret=ROt*vt*Dti/MUt;
442 if Ret<=2100
443     ac=0.35;
444     Kt=16;
445     mt=-1;
446 else if Ret>10^5
447     ac=0.14;
448     Kt=0.046;
449     mt=-0.2;
450 else
451     ac=0.14;
452     Kt=0.0791;
453     mt=-0.25;
454 end
455 end
456 C1=(2*Kt*Ntp^(3+mt)*Ns*(4*10^6*Mt)^(2+mt)*(m3*Dt)^(n*(2+mt)))/(ROt*MUt^mt*
(MUt/MUtw)^(ac)*pi^(2+mt)*Dti^(5+mt));
457 C2=1.25*Ntp^3*Ns*(4*10^6*Mt)^2*(m3*Dt)^(2*n)/(ROt*pi^2*Dti^4);
458 Sm=Lbc*(Lbb+Dctl/Ltpe*(Ltp-Dt));
459 Nb=5;Nb0=0;
460 while abs((Nb-Nb0)/Nb)>0.01
461 Nb0=Nb;
462 [Jtot,Rb,Rs,Rl] = correctionfactors(Ftw,Dctl,Lbb,angleds,Dt,Bc,Ds,Dctl,Ntt,Ntcc,
Lpp,Lbc,Res,Nb,Sm);
463 Ks4=ch*(MUs/MUsw)^0.14*Prs^(-2/3)*ROs*Cps*Jtot;
464 C4=Ks4*(10^6*Ms/ROs)^(1+a2)*(Lbb+Dctl*(Ltp-Dt)/Ltpe)^(1+a2);
465 syms Ltaa;
466 Lta=1000;
467 options=optimset('Display','off');
468 if Ret<=2100
469     C6=1860*kt/Dt*(MUt/MUtw)^0.14*(Cpt*MUt/(kt*10^3))^(1/3)*(4*10^6*Mt)^(1/3)*
(m3*Dt)^(n/3)/(pi*MUt)^(1/3);
470     Lta=fsolve(@(Ltaa) -Ltaa*(Ds-m1)^n+C5*(Ds^(1+a2)*Rbs^(1+a2)/C4+Ltaa^(1/3)*(Ds-
m1)^(n/3)/C6+C7),Lta,options);
471 else if Ret>10000
472     C10=27*kt/Dt*(Cpt*MUt/(10^3*kt))^(1/3)*(MUt/MUtw)^0.14*(4*10^6*Mt)^0.8*
(m3*Dt)^(0.8*n)*Ntp^0.8/(pi*Dti*MUt)^0.8;
473     Lta=C5*(Ds^(1+a2)*Rbs^(1+a2)/C4+(Ds-m1)^(0.8*n)/C10+C7)/(Ds-m1)^n;
474 else
475     C8=0.116*kt/Dt*(MUt/MUtw)^0.14*(Cpt*MUt/(kt*10^3))^(1/3);
476     C9=(4*10^6*Mt)^(2/3)*(m3*Dt)^(2*n/3)/(pi*MUt*Dti)^(2/3);
477     Lta=fsolve(@(Ltaa) -Ltaa/(Ds-m1)^n+C5*(Ds^(1+a2)*Rbs^(1+a2)/C4+1/(C8*(1+
Dti/Ltaa)^(2/3))*(C9/(Ds-m1)^(2*n/3)-125)+C7),Lta,options);
478 end
479 end
480 hs=C4/(Rbs^(1+a2)*Ds^(1+a2));

```

ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```

481 if Ret<=2100
482 ht=1860*kt/Dti*(Ret*Prt*Dti/Lta)^(1/3)*(MUT/MUtw)^(0.14);
483 else if Ret>10000
484     ht=27*kt/Dti*Ret^0.8*Prt^(1/3)*(MUT/MUtw)^(0.14);
485 else
486     ht=116*(Ret^(2/3)-125)*Prt^(1/3)*(1+Dti/Lta)^(2/3)*(MUT/MUtw)^(0.14);
487 end
488 end
489 Tw=Ttav+(Tsav-Ttav)/(1+ht/hs);
490 [MUT,MUS,MUtw,MUsw] = viscosidades(MUtin,MUtin,MUtin,MUtin,Tw,Ttin,Ttout,Tsin,
Tsout,ROt,ROs);
491 Prs=Cps*MUS/(10^3*ks);
492 Prt=Cpt*MUT/(10^3*kt);
493 Lts=0.1*Ds;
494 if Lts<25
495     Lts=25;
496 end
497 Ltt=Lta+2*Lts;
498 Nb=(Lta-Lbc*(Li+Lo))/Lbc+1;
499 end
500 %Shell-side pressure drop, Cálculo Rp y C3
501 if Res>=2100 %turbulento
502 Ks1=(Sm/Sw)*((1+0.3*Ntcw)*Rl*Nb*ROs)/((Nb+1)*Ds);
503 Ks2=((Nb-1)/(Nb+1)*Rl+(Ntcc+Ntcw)/(Ntcc*(Nb+1))*Rs)*(1-2*(Bc/100))*(2*Rb*ROs*cp)
/((MUS/MUsw)^-0.14*Lpp);
504 Rp=-b2/(Ks1/(Ks2*vs^b2)+1);
505 Ks3=Ks1*vs^Rp+Ks2*vs^(Rp+b2);
506 else%laminar
507 Ntw=Ntt*Ftw;
508 Dw=4*Sw/(pi*Dt*Ntw+Ds*angleds/2);
509 k1=(26*10^3*Nb*Rl*MUS)/((Nb+1)*Ds*sqrt(Sw/Sm))*(Ntcw/(Ltp-Dt)+Lbc/Dw^2);
510 k2=Nb*Rl*ROs/((Nb+1)*Ds)*(Sm/Sw);
511 k3=((Nb-1)*Rl/(Nb+1)+(Ntcc+Ntcw)*Rs/(Ntcc*(Nb+1)))*(1-2*(Bc/100))*(2*Rb*ROs*cp)
/((MUS/MUsw)^-0.14*Lpp);
512 Rp=2-(k1+2*k2*vs+k3*(2+b2)*vs^(1+b2))/(k1+k2*vs+k3*vs^(1+b2));
513 Ks3=(k1*vs^-1+k2+k3*vs^b2)*vs^Rp;
514 end
515 C3=((Nb+1)/((Nb-1)+(Li+Lo)))*(Ks3^4*Ns*Ms^(2-Rp))/(ROs*10^-6*(Lbb+Dct1*(Ltp-Dt)
/Ltpe))^(2-Rp);
516 delPs=C3*Lta/(Rbs^(3-Rp)*Ds^(2-Rp));

518 A=pi*Dt*Lta*Ntt*Ns*10^-6;
519 TAC=Af*(Ca+Cb*A^c+Ce+Cf*(Ms*delPs/ROs)^g+Ce+Cf*(Mt*delPt/ROt)^g)+Cpow*H/rend*
(Ms*delPs/ROs+Mt*delPt/ROt);
520 %Rbsmin vtmx
521     else if punto==5;
522 Rbs=Rbsmin;
523 vt=vtmax;
524 Ret=ROt*vt*Dti/MUT;%Dti en mm
525 Ntt=fix(((4*10^6*Mt*Ntp)/(pi*vt*ROt*Dti^2)/Ntp)+1)*Ntp;
526 Ds=m1+m3*Dt*(Ntt)^(1/n);
527 Lts=0.1*Ds;
528 if Lts<25

```

ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```

529     Lts=25;
530 end
531 Dotl=Dt*(Ntt/K1)^(1/n);
532 Lbb=Ds-Dotl;
533 Dctl=Dotl-Dt;
534 anglectl=2*acos((Ds/Dctl)*(1-2*Bc/100))*360/(2*pi);
535 Ftw= anglectl/360-sin(anglectl*2*pi/360)/(2*pi);
536 if Ret<=2100
537     ac=0.35;
538     Kt=16;
539     mt=-1;
540 else if Ret>10^5
541     ac=0.14;
542     Kt=0.046;
543     mt=-0.2;
544 else
545     ac=0.14;
546     Kt=0.0791;
547     mt=-0.25;
548 end
549 end
550 C1=(2*Kt*Ntp^(3+mt)*Ns*(4*10^6*Mt)^(2+mt)*(m3*Dt)^(n*(2+mt)))/(ROt*MUt^mt*
(MUt/MUtw)^(ac)*pi^(2+mt)*Dti^(5+mt));
551 C2=1.25*Ntp^3*Ns*(4*10^6*Mt)^2*(m3*Dt)^(2*n)/(ROt*pi^2*Dti^4);
552 Swg=pi/4*Dc^2*(angleds/360-sin(angleds*2*pi/360)/(2*pi));
553 Swt=Ntt*Ftw*pi/4*Dc^2;
554 Sw=Swg-Swt;
555 Lbc=Rbs*Dc;
556 Sm=Lbc*(Lbb+Dctl/Ltpe*(Ltp-Dt));
557 vs=Ms*10^6/(ROs*Sm);
558 Res=ROs*vs*De/MUs;%De en mm
559 [a1,a2,a3,a4,b1,b2,b3,b4]=parametrostablal(Res,layout(2),tablacoeff1);
560 a=a3/(1+0.14*Res^(a4));
561 b=b3/(1+0.14*Res^(b4));
562 ch=a1*(1.33*Dt/Ltp)^(a)*(ROs*Dt/MUs)^(a2);
563 cp=b1*(1.33*Dt/Ltp)^(b)*(ROs*Dt/MUs)^(b2);
564 Ntcc=Ds/Lpp*(1-2*(Bc/100));
565 Ntcw=0.8/Lpp*(Ds*(Bc/100));
566 Nb=5;
567 Nb0=0;
568 while
569     Nb0=Nb;
570     [Jtot,Rb,Rs,Rl] = correctionfactors(Ftw,Dctl,Lbb,angleds,Dt,Bc,Ds,Dotl,Ntt,Ntcc,
Lpp,Lbc,Res,Nb,Sm);
571 %Shell-side pressure drop, Cálculo Rp y C3
572 if Res>=2100 %turbulento
573     Ks1=(Sm/Sw)*((1+0.3*Ntcw)*Rl*Nb*ROs)/((Nb+1)*Ds);
574     Ks2=((Nb-1)/(Nb+1)*Rl+((Ntcc+Ntcw)/(Ntcc*(Nb+1))*Rs))*(1-2*(Bc/100))*(2*Rb*ROs*cp)
/(MUs/MUsw)^-0.14*Lpp);
575     Rp=-b2/(Ks1/(Ks2*vs^b2)+1);
576     Ks3=Ks1*vs^Rp+Ks2*vs^(Rp+b2);
577 else%laminar
578     Ntw=Ntt*Ftw;

```

# ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```

579 Dw=4*Sw/(pi*Dt*Ntw+Ds*angleds/2);
580 k1=(26*10^3*Nb*Rl*MUs)/((Nb+1)*Ds*sqrt(Sw/Sm))*(Ntcw/(Ltp-Dt)+Lbc/Dw^2);
581 k2=Nb*Rl*ROs/((Nb+1)*Ds)*(Sm/Sw);
582 k3=((Nb-1)*Rl/(Nb+1)+(Ntcc+Ntcw)*Rs/(Ntcc*(Nb+1)))*(1-2*(Bc/100))*(2*Rb*ROs*cp)/
(MUs/MUsw)^-0.14*Lpp);
583 Rp=2-(k1+2*k2*vs+k3*(2+b2)*vs^(1+b2))/(k1+k2*vs+k3*vs^(1+b2));
584 Ks3=(k1*vs^-1+k2+k3*vs^b2)*vs^Rp;
585 end
586 C3=((Nb+1)/((Nb-1)+(Li+Lo)))*(Ks3^4*Ns*Ms^(2-Rp))/(ROs*10^-6*(Lbb+Dctl*(Ltp-Dt)
/Ltpe))^(2-Rp);
587 Ks4=ch*(MUs/MUsw)^0.14*Prs^(-2/3)*ROs*Cps*Jtot;
588 C4=Ks4*(10^6*Ms/ROs)^(1+a2)*(Lbb+Dctl*(Ltp-Dt)/Ltpe)^(1+a2);
589 syms Lta
590 options=optimset('Display','off');
591 Lta=1000;
592 if Ret<=2100
593     C6=1860*kt/Dt*(MUt/MUtw)^0.14*(Cpt*MUt/(kt*10^3))^(1/3)*(4*10^6*Mt)^(1/3)*
(m3*Dt)^(n/3)/(pi*MUt)^(1/3);
594     Lta=fsolve(@ (Ltaa) -Ltaa*(Ds-m1)^n+C5*(Ds^(1+a2)*Rbs^(1+a2)/C4+Ltaa^(1/3)*(Ds-
m1)^(n/3)/C6+C7),Lta,options);
595 else if Ret>10000
596     C10=27*kt/Dt*(Cpt*MUt/(10^3*kt))^(1/3)*(MUt/MUtw)^0.14*(4*10^6*Mt)^0.8*
(m3*Dt)^(0.8*n)*Ntp^0.8/(pi*Dti*MUt)^0.8;
597     Lta=C5*(Ds^(1+a2)*Rbs^(1+a2)/C4+(Ds-m1)^(0.8*n)/C10+C7)/(Ds-m1)^n;
598 else
599     C8=0.116*kt/Dt*(MUt/MUtw)^0.14*(Cpt*MUt/(kt*10^3))^(1/3);
600     C9=(4*10^6*Mt)^(2/3)*(m3*Dt)^(2*n/3)/(pi*MUt*Dti)^(2/3);
601     Lta=fsolve(@ (Ltaa) -Ltaa*(Ds-m1)^n+C5*(Ds^(1+a2)*Rbs^(1+a2)/C4+1/(C8*(1+
Dti/Ltaa)^(2/3))*(C9/(Ds-m1)^(2*n/3)-125)+C7),Lta,options);
602 end
603 end
604 hs=C4/(Rbs^(1+a2)*Ds^(1+a2));
605 if Ret<=2100
606 ht=1860*kt/Dti*(Ret*Prt*Dti/Lta)^(1/3)*(MUt/MUtw)^(0.14);
607 else if Ret>10000
608     ht=27*kt/Dti*Ret^0.8*Prt^(1/3)*(MUt/MUtw)^(0.14);
609 else
610     ht=116*(Ret^(2/3)-125)*Prt^(1/3)*(1+Dti/Lta)^(2/3)*(MUt/MUtw)^(0.14);
611 end
612 end

614 [MUt,MUs,MUtw,MUsw] = viscosidades(MUtin,MUsin,MUtout,MUsout,Tw,Ttin,Ttout,Tsin,
Tsout,ROt,ROs);
615 Prs=Cps*MUs/(10^3*ks);
616 Prt=Cpt*MUt/(10^3*kt);
617 Ltt=Lta+2*Lts;
618 Nb=(Lta-Lbc*(Li+Lo))/Lbc+1;
619 end
620 %coste
621 delPs=C3*Lta/(Rbs^(3-Rp)*Ds^(2-Rp));
622 delPt=C1*Ltt/(Ds-m1)^(n*(2+mt))+C2/(Ds-m1)^(2*n);
623 A=pi*Dt*Lta*Ntt*Ns*10^-6;
624 TAC=Af*(Ca+Cb*A^c+Ce+Cf*(Ms*delPs/ROs)^g+Ce+Cf*(Mt*delPt/ROt)^g)+Cpow*H/rend*

```



ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```
(Ms*delPs/ROs*Mt*delPt/ROt);
625 %vsmax vtmax
626         else if punto==6
627 vt=vtmax;
628 vs=vsmax;
629 Ret=ROt*vt*Dti/MUt;
630 Ntt=fix(((4*10^6*Mt*Ntp)/(pi*vt*ROt*Dti^2)/Ntp)+1)*Ntp;
631 Ds=m1+m3*Dt*(Ntt)^(1/n);
632 Lts=0.1*Ds;
633 if Lts<25
634     Lts=25;
635 end
636 Dotl=Dt*(Ntt/K1)^(1/n);
637 Lbb=Ds-Dotl;
638 Dctl=Dotl-Dt;
639 Lbc=10^6*Ms/(vs*ROs*(Lbb+Dctl/Ltpe*(Ltp-Dt)));
640 Rbs=Lbc/Ds;
641 anglectl=2*acos((Ds/Dctl)*(1-2*Bc/100))*360/(2*pi);
642 Ftw= anglectl/360-sin(anglectl*2*pi/360)/(2*pi);
643 if Ret<=2100
644     ac=0.35;
645     Kt=16;
646     mt=-1;
647 else if Ret>10^5
648     ac=0.14;
649     Kt=0.046;
650     mt=-0.2;
651 else
652     ac=0.14;
653     Kt=0.0791;
654     mt=-0.25;
655 end
656 end
657 Ntcw=0.8/Lpp*(Ds*(Bc/100));
658 Ntcc=Ds/Lpp*(1-2*(Bc/100));
659 C1=(2*Kt*Ntp^(3+mt)*Ns*(4*10^6*Mt)^(2+mt)*(m3*Dt)^(n*(2+mt)))/(ROt*MUt^mt*
(MUt/MUtw)^(ac)*pi^(2+mt)*Dti^(5+mt));
660 C2=1.25*Ntp^3*Ns*(4*10^6*Mt)^2*(m3*Dt)^(2*n)/(ROt*pi^2*Dti^4);
661 Swg=pi/4*Ds^2*(angleds/360-sin(angleds*2*pi/360)/(2*pi));
662 Swt=Ntt*Ftw*pi/4*Dt^2;
663 Sw=Swg-Swt;
664 Res=ROs*vs*De/MUs;
665 [a1,a2,a3,a4,b1,b2,b3,b4]=parametrostablal(Res,layout(2),tablacoefl);
666 a=a3/(1+0.14*Res^(a4));
667 b=b3/(1+0.14*Res^(b4));
668 ch=a1*(1.33*Dt/Ltp)^(a)*(ROs*Dt/MUs)^(a2);
669 cp=b1*(1.33*Dt/Ltp)^(b)*(ROs*Dt/MUs)^(b2);
670 Sm=Lbc*(Lbb+Dctl/Ltpe*(Ltp-Dt));
671 Nb=5;Nb0=0;
672 while abs((Nb-Nb0)/Nb)>0.01
673 Nb0=Nb;
674 %CORRECTION FACTORS for heat transfer and pressure drop
675 [Jtot,Rb,Rs,Rl] = correctionfactors(Ftw,Dctl,Lbb,angleds,Dt,Bc,Ds,Dotl,Ntt,Ntcc,
```

ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```

Lpp,Lbc,Res,Nb,Sm);
676 Ks4=ch*(MUs/MUsw)^0.14*Prs^(-2/3)*ROs*Cps*Jtot;
677 C4=Ks4*(10^6*Ms/ROs)^(1+a2)*(Lbb+Dct1*(Ltp-Dt)/Ltpe)^-(1+a2);
678 syms Ltaa;
679 Lta=1000;
680 options=optimset('Display','off');
681 if Ret<=2100
682     C6=1860*kt/Dt*(MUt/MUtw)^0.14*(Cpt*MUt/(kt*10^3))^(1/3)*(4*10^6*Mt)^(1/3)*
(m3*Dt)^(n/3)/(pi*MUt)^(1/3);
683     Lta=fsolve(@ (Ltaa) -Ltaa*(Ds-m1)^n+C5*(Ds^(1+a2)*Rbs^(1+a2)/C4+Ltaa^(1/3)*(Ds-
m1)^(n/3)/C6+C7),Lta,options);
684 else if Ret>10000
685     C10=27*kt/Dt*(Cpt*MUt/(10^3*kt))^(1/3)*(MUt/MUtw)^0.14*(4*10^6*Mt)^0.8*
(m3*Dt)^(0.8*n)*Ntp^0.8/(pi*Dti*MUt)^0.8;
686     Lta=C5*(Ds^(1+a2)*Rbs^(1+a2)/C4+(Ds-m1)^(0.8*n)/C10+C7)/(Ds-m1)^n;
687 else
688     C8=0.116*kt/Dt*(MUt/MUtw)^0.14*(Cpt*MUt/(kt*10^3))^(1/3);
689     C9=(4*10^6*Mt)^(2/3)*(m3*Dt)^(2*n/3)/(pi*MUt*Dti)^(2/3);
690     Lta=fsolve(@ (Ltaa) -Ltaa/(Ds-m1)^n+C5*(Ds^(1+a2)*Rbs^(1+a2)/C4+1/(C8*(1+
Dti/Ltaa)^(2/3))*(C9/(Ds-m1)^(2*n/3)-125)+C7),Lta,options);
691 end
692 end
693 hs=C4/(Rbs^(1+a2)*Ds^(1+a2));
694 if Ret<=2100
695 ht=1860*kt/Dti*(Ret*Prt*Dti/Lta)^(1/3)*(MUt/MUtw)^(0.14);
696 else if Ret>10000
697     ht=27*kt/Dti*Ret^0.8*Prt^(1/3)*(MUt/MUtw)^(0.14);
698 else
699     ht=116*(Ret^(2/3)-125)*Prt^(1/3)*(1+Dti/Lta)^(2/3)*(MUt/MUtw)^(0.14);
700 end
701 end
702 Tw=Ttav+(Tsav-Ttav)/(1+ht/hs);
703 [MUt,MUs,MUtw,MUsw] = viscosidades(MUtin,MUusin,MUtout,MUsout,Tw,Ttin,Ttout,Tsin,
Tsout,ROt,ROs);
704 Prs=Cps*MUs/(10^3*ks);
705 Prt=Cpt*MUt/(10^3*kt);
706 Ltt=Lta+2*Lts;
707 Nb=(Lta-Lbc*(Li+Lo))/Lbc+1;
708 end
709 if Res>=2100 %turbulento

711 Ks2=((Nb-1)/(Nb+1)*Rl+((Ntcc+Ntcw)/(Ntcc*(Nb+1))*Rs))*(1-2*(Bc/100))*(2*Rb*ROs*cp)
/((MUs/MUsw)^-0.14*Lpp);
712 Rp=-b2/(Ks1/(Ks2*vs^b2)+1);
713 Ks3=Ks1*vs^Rp+Ks2*vs^(Rp+b2);
714 else%laminar
715 k1=(26*10^3*Nb*Rl*MUs)/((Nb+1)*Ds*sqrt(Sw/Sm))*(Ntcw/(Ltp-Dt)+Lbc/Dw^2);%que es Dw
716 k2=Nb*Rl*ROs/((Nb+1)*Ds)*(Sm/Sw);
717 k3=((Nb-1)*Rl/(Nb+1)+(Ntcc+Ntcw)*Rs/(Ntcc*(Nb+1)))*(1-2*(Bc/100))*(2*Rb*ROs*cp)/
((MUs/MUsw)^-0.14*Lpp);
718 Rp=2-(k1+2*k2*vs+k3*(2+b2)*vs^(1+b2))/(k1+k2*vs+k3*vs^(1+b2));
719 Ks3=(k1*vs^-1+k2+k3*vs^b2)*vs^Rp;%B15 no seguro si es exponente!!!
720 end

```

# ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```

721 C3=((Nb+1)/((Nb-1)+(Li+Lo)))*(Ks3*4*Ns*Ms^(2-Rp))/(ROs*10^-6*(Lbb+Dctl*(Ltp-Dt)
/Ltpe))^(2-Rp);
722 hs=C4/(Rbs^(1+a2)*Ds^(1+a2));
723 delPs=C3*Lta/(Rbs^(3-Rp)*Ds^(2-Rp));
724 delPt=C1*Ltt/(Ds-m1)^(n*(2+mt))+C2/(Ds-m1)^(2*n);
725 A=pi*Dt*Lta*Ntt*Ns*10^-6;
726 TAC=Af*(Ca+Cb*A^c+Ce+Cf*(Ms*delPs/ROs)^g+Ce+Cf*(Mt*delPt/ROt)^g)+Cpow*H/rend*
(Ms*delPs/ROs+Mt*delPt/ROt);
727 %vtmin vsmin
728             else if punto==7
729 vt=vtmin;
730 vs=vsmin;
731 Ret=ROt*vt*Dti/MUt;
732 Ntt=fix(((4*10^6*Mt*Ntp)/(pi*vt*ROt*Dti^2)/Ntp)+1)*Ntp;
733 Ds=m1+m3*Dt*(Ntt)^(1/n);
734 Lts=0.1*Ds;
735 if Lts<25
736     Lts=25;
737 end
738 Dotl=Dt*(Ntt/K1)^(1/n);
739 Lbb=Ds-Dotl;
740 Dctl=Dotl-Dt;
741 Lbc=10^6*Ms/(vs*ROs*(Lbb+Dctl/Ltpe*(Ltp-Dt)));
742 Rbs=Lbc/Ds;
743 anglectl=2*acos((Ds/Dctl)*(1-2*Bc/100))*360/(2*pi);
744 Ftw= anglectl/360-sin(anglectl*2*pi/360)/(2*pi);
745 if Ret<=2100
746     ac=0.35;
747     Kt=16;
748     mt=-1;
749 else if Ret>10^5
750     ac=0.14;
751     Kt=0.046;
752     mt=-0.2;
753 else
754     ac=0.14;
755     Kt=0.0791;
756     mt=-0.25;
757 end
758 end
759 Ntcw=0.8/Lpp*(Ds*(Bc/100));
760 Ntcc=Ds/Lpp*(1-2*(Bc/100));
761 C1=(2*Kt*Ntp^(3+mt)*Ns*(4*10^6*Mt)^(2+mt)*(m3*Dt)^(n*(2+mt)))/(ROt*MUt^mt*
(MUt/MUtw)^(ac)*pi^(2+mt)*Dti^(5+mt));
762 C2=1.25*Ntp^3*Ns*(4*10^6*Mt)^2*(m3*Dt)^(2*n)/(ROt*pi^2*Dti^4);
763 Swg=pi/4*Ds^2*(angleds/360-sin(angleds*2*pi/360)/(2*pi));
764 Swt=Ntt*Ftw*pi/4*Dt^2;
765 Sw=Swg-Swt;
766 Res=ROs*vs*De/MUs;
767 [a1,a2,a3,a4,b1,b2,b3,b4]=parametrostablal(Res,layout(2),tablacoeff1);
768 a=a3/(1+0.14*Res^(a4));
769 b=b3/(1+0.14*Res^(b4));
770 ch=a1*(1.33*Dt/Ltp)^(a)*(ROs*Dt/MUs)^(a2);

```

# ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```

771 cp=b1*(1.33*Dt/Ltp)^(b)*(ROs*Dt/MUs)^(b2);
772 Sm=Lbc*(Lbb+Dctl/Ltpe*(Ltp-Dt));
773 Nb=5;
774 Nb0=0;
775 while abs((Nb-Nb0)/Nb)>0.01
776 Nb0=Nb;
777 %CORRECTION FACTORS for heat transfer and pressure drop
778 [Jtot,Rb,Rs,Rl] = correctionfactors(Ftw,Dctl,Lbb,angleds,Dt,Bc,Ds,Dotl,Ntt,Ntcc,
Lpp,Lbc,Res,Nb,Sm);
779 Ks4=ch*(MUs/MUsw)^0.14*Prs^(-2/3)*ROs*Cps*Jtot;
780 C4=Ks4*(10^6*Ms/ROs)^(1+a2)*(Lbb+Dctl*(Ltp-Dt)/Ltpe)^-(1+a2);
781 syms Ltaa;
782 Lta=1000;
783 options=optimset('Display','off');
784 if Ret<=2100
785     C6=1860*kt/Dt*(MUt/MUtw)^0.14*(Cpt*MUt/(kt*10^3))^(1/3)*(4*10^6*Mt)^(1/3)*
(m3*Dt)^(n/3)/(pi*MUt)^(1/3);
786     Lta=fsolve(@ (Ltaa) -Ltaa*(Ds-m1)^n+C5*(Ds^(1+a2)*Rbs^(1+a2)/C4+Ltaa^(1/3)*(Ds-
m1)^(n/3)/C6+C7),Lta,options);
787 else if Ret>10000
788     C10=27*kt/Dt*(Cpt*MUt/(10^3*kt))^(1/3)*(MUt/MUtw)^0.14*(4*10^6*Mt)^0.8*
(m3*Dt)^(0.8*n)*Ntp^0.8/(pi*Dti*MUt)^0.8;
789     Lta=C5*(Ds^(1+a2)*Rbs^(1+a2)/C4+(Ds-m1)^(0.8*n)/C10+C7)/(Ds-m1)^n;
790 else
791     C8=0.116*kt/Dt*(MUt/MUtw)^0.14*(Cpt*MUt/(kt*10^3))^(1/3);
792     C9=(4*10^6*Mt)^(2/3)*(m3*Dt)^(2*n/3)/(pi*MUt*Dti)^(2/3);
793     Lta=fsolve(@ (Ltaa) -Ltaa/(Ds-m1)^n+C5*(Ds^(1+a2)*Rbs^(1+a2)/C4+1/(C8*(1+
Dti/Ltaa)^(2/3))*(C9/(Ds-m1)^(2*n/3)-125)+C7),Lta,options);
794 end
795 end
796 hs=C4/(Rbs^(1+a2)*Ds^(1+a2));
797 if Ret<=2100
798 ht=1860*kt/Dti*(Ret*Prt*Dti/Lta)^(1/3)*(MUt/MUtw)^(0.14);
799 else if Ret>10000
800     ht=27*kt/Dti*Ret^0.8*Prt^(1/3)*(MUt/MUtw)^(0.14);
801 else
802     ht=116*(Ret^(2/3)-125)*Prt^(1/3)*(1+Dti/Lta)^(2/3)*(MUt/MUtw)^(0.14);
803 end
804 end
805 Tw=Ttav+(Tsav-Ttav)/(1+ht/hs);
806 [MUt,MUs,MUtw,MUsw] = viscosidades(MUtin,MUsin,MUtout,MUsout,Tw,Ttin,Ttout,Tsin,
Tsout,ROt,ROs);
807 Prs=Cps*MUs/(10^3*ks);
808 Prt=Cpt*MUt/(10^3*kt);
809 Ltt=Lta+2*Lts;
810 Nb=(Lta-Lbc*(Li+Lo))/Lbc+1;
811 end
812 if Res>=2100 %turbulento
813 Ks1=(Sm/Sw)*((1+0.3*Ntcw)*Rl*Nb*ROs)/((Nb+1)*Ds);
814 Ks2=((Nb-1)/(Nb+1)*Rl+(Ntcc+Ntcw)/(Ntcc*(Nb+1))*Rs)*(1-2*(Bc/100))*(2*Rb*ROs*cp)
/((MUs/MUsw)^-0.14*Lpp);
815 Rp=-b2/(Ks1/(Ks2*vs^b2)+1);
816 Ks3=Ks1*vs^Rp+Ks2*vs^(Rp+b2);

```

ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```

817 else%laminar
818 k1=(26*10^3*Nb*Rl*MUs)/((Nb+1)*Ds*sqrt(Sw/Sm))*(Ntcw/(Ltp-Dt)+Lbc/Dw^2);%que es Dw
819 k2=Nb*Rl*ROs/((Nb+1)*Ds)*(Sm/Sw);
820 k3=((Nb-1)*Rl/(Nb+1)+(Ntcc+Ntcw)*Rs/(Ntcc*(Nb+1)))*(1-2*(Bc/100))*(2*Rb*ROs*cp)/
(MUs/MUsw)^-0.14*Lpp);
821 Rp=2-(k1+2*k2*vs+k3*(2+b2)*vs^(1+b2))/(k1+k2*vs+k3*vs^(1+b2));
822 Ks3=(k1*vs^-1+k2+k3*vs^b2)*vs^Rp;%B15 no seguro si es exponente!!!
823 end
824 C3=((Nb+1)/((Nb-1)+(Li+Lo)))*(Ks3^4*Ns*Ms^(2-Rp))/(ROs*10^-6*(Lbb+Dctl*(Ltp-Dt)
/Ltpe))^(2-Rp);
825 hs=C4/(Rbs^(1+a2)*Ds^(1+a2));
826 delPs=C3*Lta/(Rbs^(3-Rp)*Ds^(2-Rp));
827 delPt=C1*Ltt/(Ds-m1)^(n*(2+mt))+C2/(Ds-m1)^(2*n);
828 A=pi*Dt*Lta*Ntt*Ns*10^-6;
829 TAC=Af*(Ca+Cb*A^c+Ce+Cf*(Ms*delPs/ROs)^g+Ce+Cf*(Mt*delPt/ROt)^g)+Cpow*H/rend*
(Ms*delPs/ROs+Mt*delPt/ROt);
830 %vsminDsmax
831                                     else if punto==8
832 vs=vsmin;
833 Ds=Dsmax;
834 Res=ROs*vs*De/MUs;
835 [a1,a2,a3,a4,b1,b2,b3,b4]=parametrostablal(Res,layout(2),tablacoeff1);
836 a=a3/(1+0.14*Res^(a4));
837 b=b3/(1+0.14*Res^(b4));
838 ch=a1*(1.33*Dt/Ltp)^(a)*(ROs*Dt/MUs)^(a2);
839 cp=b1*(1.33*Dt/Ltp)^(b)*(ROs*Dt/MUs)^(b2);
840 Ntt=((Ds-m1)/(m3*Dt))^n;
841 Dotl=Dt*(Ntt/K1)^(1/n);
842 Lbb=Ds-Dotl;
843 Dctl=Dotl-Dt;
844 Lbc=10^6*Ms/(vs*ROs*(Lbb+Dctl/Ltpe*(Ltp-Dt)));
845 Rbs=Lbc/Ds;
846 anglectl=2*acos((Ds/Dctl)*(1-2*Bc/100))*360/(2*pi);
847 Ftw= anglectl/360-sin(anglectl*2*pi/360)/(2*pi);
848 Swg=pi/4*Ds^2*(angleds/360-sin(angleds*2*pi/360)/(2*pi));
849 Swt=Ntt*Ftw*pi/4*Dt^2;
850 Sw=Swg-Swt;
851 Ntcc=Ds/Lpp*(1-2*(Bc/100));
852 Ntcw=0.8/Lpp*(Ds*(Bc/100));
853 vt=4*10^6*Mt*Ntp/(pi*ROt*Dti^2*Ntt);
854 Ret=ROt*vt*Dti/MUt;
855 if Ret<=2100
856     ac=0.35;
857     Kt=16;
858     mt=-1;
859 else if Ret>10^5
860     ac=0.14;
861     Kt=0.046;
862     mt=-0.2;
863     else
864     ac=0.14;
865     Kt=0.0791;
866     mt=-0.25;

```

ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```

867     end
868 end
869 C1=(2*Kt*Ntp^(3+mt)*Ns*(4*10^6*Mt)^(2+mt)*(m3*Dt)^(n*(2+mt)))/(ROt*MUt^mt*
(MUt/MUtw)^(ac)*pi^(2+mt)*Dti^(5+mt));
870 C2=1.25*Ntp^3*Ns*(4*10^6*Mt)^2*(m3*Dt)^(2*n)/(ROt*pi^2*Dti^4);
871 Sm=Lbc*(Lbb+Dctl/Ltpe*(Ltp-Dt));
872 Nb=5;
873 Nb0=0;
874 while abs((Nb-Nb0)/Nb)>0.01
875 Nb0=Nb;
876 [Jtot,Rb,Rs,Rl] = correctionfactors(Ftw,Dctl,Lbb,angleds,Dt,Bc,Ds,Dctl,Ntt,Ntcc,
Lpp,Lbc,Res,Nb,Sm);
877 Ks4=ch*(MUs/MUsw)^0.14*Prs^(-2/3)*ROs*Cps*Jtot;
878 C4=Ks4*(10^6*Ms/ROs)^(1+a2)*(Lbb+Dctl*(Ltp-Dt)/Ltpe)^(1+a2);
879
880 syms Ltaa;
881 Lta=1000;
882 options=optimset('Display','off');
883 if Ret<=2100
884     C6=1860*kt/Dt*(MUt/MUtw)^0.14*(Cpt*MUt/(kt*10^3))^(1/3)*(4*10^6*Mt)^(1/3)*
(m3*Dt)^(n/3)/(pi*MUt)^(1/3);
885     Lta=fsolve(@(Ltaa) -Ltaa*(Ds-m1)^n+C5*(Ds^(1+a2)*Rbs^(1+a2)/C4+Ltaa^(1/3)*(Ds-
m1)^(n/3)/C6+C7),Lta,options);
886 else if Ret>10000
887     C10=27*kt/Dt*(Cpt*MUt/(10^3*kt))^(1/3)*(MUt/MUtw)^0.14*(4*10^6*Mt)^0.8*
(m3*Dt)^(0.8*n)*Ntp^0.8/(pi*Dti*MUt)^0.8;
888     Lta=C5*(Ds^(1+a2)*Rbs^(1+a2)/C4+(Ds-m1)^(0.8*n)/C10+C7)/(Ds-m1)^n;
889 else
890     C8=0.116*kt/Dt*(MUt/MUtw)^0.14*(Cpt*MUt/(kt*10^3))^(1/3);
891     C9=(4*10^6*Mt)^(2/3)*(m3*Dt)^(2*n/3)/(pi*MUt*Dti)^(2/3);
892     Lta=fsolve(@(Ltaa) -Ltaa/(Ds-m1)^n+C5*(Ds^(1+a2)*Rbs^(1+a2)/C4+1/(C8*(1+
Dti/Ltaa)^(2/3))*(C9/(Ds-m1)^(2*n/3)-125)+C7),Lta,options);
893     end
894 end
895 hs=C4/(Rbs^(1+a2)*Ds^(1+a2));
896 if Ret<=2100
897 ht=1860*kt/Dti*(Ret*Prt*Dti/Lta)^(1/3)*(MUt/MUtw)^(0.14);
898 else if Ret>10000
899     ht=27*kt/Dti*Ret^0.8*Prt^(1/3)*(MUt/MUtw)^(0.14);
900     else
901
902     end
903 end
904 Tw=Ttav+(Tsav-Ttav)/(1+ht/hs);
905 [MUt,MUs,MUtw,MUsw] = viscosidades(MUtin,MUsin,MUtout,MUsout,Tw,Ttin,Ttout,Tsin,
Tsout,ROt,ROs);
906 Prs=Cps*MUs/(10^3*ks);
907 Prt=Cpt*MUt/(10^3*kt);
908 Lts=0.1*Ds;
909 if Lts<25
910     Lts=25;
911 end
912 Ltt=Lta+2*Lts;

```

# ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```

913 Nb=(Lta-Lbc*(Li+Lo))/Lbc+1;
914 end
915 %Shell-side pressure drop, Cálculo Rp y C3
916 if Res>=2100 %turbulento
917 Ks1=(Sm/Sw)*((1+0.3*Ntcw)*Rl*Nb*ROs)/((Nb+1)*Ds);
918 Ks2=((Nb-1)/(Nb+1)*Rl+(Ntcc+Ntcw)/(Ntcc*(Nb+1))*Rs)*(1-2*(Bc/100))*(2*Rb*ROs*cp)
/((MUs/MUsw)^-0.14*Lpp);
919 Rp=-b2/(Ks1/(Ks2*vs^b2)+1);
920 Ks3=Ks1*vs^Rp+Ks2*vs^(Rp+b2);
921 else%laminar
922 Ntw=Ntt*Ftw;
923 Dw=4*Sw/(pi*Dt*Ntw+Ds*angleds/2);
924 k1=(26*10^3*Nb*Rl*MUs)/((Nb+1)*Ds*sqrt(Sw/Sm))*(Ntcw/(Ltp-Dt)+Lbc/Dw^2);
925 k2=Nb*Rl*ROs/((Nb+1)*Ds)*(Sm/Sw);
926 k3=((Nb-1)*Rl/(Nb+1)+(Ntcc+Ntcw)*Rs/(Ntcc*(Nb+1)))*(1-2*(Bc/100))*(2*Rb*ROs*cp)
/((MUs/MUsw)^-0.14*Lpp);
927 Rp=2-(k1+2*k2*vs+k3*(2+b2)*vs^(1+b2))/(k1+k2*vs+k3*vs^(1+b2));
928 Ks3=(k1*vs^-1+k2+k3*vs^b2)*vs^Rp;
929 end
930 C3=((Nb+1)/((Nb-1)+(Li+Lo)))*(Ks3^4*Ns*Ms^(2-Rp))/(ROs*10^-6*(Lbb+Dctl*(Ltp-Dt)
/Ltpe))^(2-Rp);
931 delPs=C3*Lta/(Rbs^(3-Rp)*Ds^(2-Rp));
932 delPt=C1*Ltt/(Ds-m1)^(n*(2+mt))+C2/(Ds-m1)^(2*n);
933 A=pi*Dt*Lta*Ntt*Ns*10^-6;
934 TAC=Af*(Ca+Cb*A^c+Ce+Cf*(Ms*delPs/ROs)^g+Ce+Cf*(Mt*delPt/ROt)^g)+Cpow*H/rend
(Ms*delPs/ROs+Mt*delPt/ROt);
935 %VtmindelPsmax
936 else
937 vt=vtmin;
938 vs=vsmax;
939 Ret=ROt*vt*Dti/MUt;
940 Ntt=fix(((4*10^6*Mt*Ntp)/(pi*vt*ROt*Dti^2)/Ntp)+1)*Ntp;
941 Ds=m1+m3*Dt*(Ntt)^(1/n);
942 Lts=0.1*Ds;
943 if Lts<25
944     Lts=25;
945 end
946 Dotl=Dt*(Ntt/K1)^(1/n);
947 Lbb=Ds-Dotl;
948 Dctl=Dotl-Dt;
949 Lbc=10^6*Ms/(vs*ROs*(Lbb+Dctl/Ltpe*(Ltp-Dt)));
950 Rbs=Lbc/Ds;
951 anglectl=2*acos((Ds/Dctl)*(1-2*Bc/100))*360/(2*pi);
952 Ftw= anglectl/360-sin(anglectl*2*pi/360)/(2*pi);
953 if Ret<=2100
954     ac=0.35;
955     Kt=16;
956     mt=-1;
957 else if Ret>10^5
958     ac=0.14;
959     Kt=0.046;
960     mt=-0.2;
961 else

```

ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```

962     ac=0.14;
963     Kt=0.0791;
964     mt=-0.25;
965     end
966 end
967 Ntcw=0.8/Lpp*(Ds*(Bc/100));
968 Ntcc=Ds/Lpp*(1-2*(Bc/100));
969 C1=(2*Kt*Ntp^(3+mt)*Ns*(4*10^6*Mt)^(2+mt)*(m3*Dt)^(n*(2+mt)))/(ROt*MUt^mt*
(MUt/MUtw)^(ac)*pi^(2+mt)*Dti^(5+mt));
970 C2=1.25*Ntp^3*Ns*(4*10^6*Mt)^2*(m3*Dt)^(2*n)/(ROt*pi^2*Dti^4);
971 Swg=pi/4*Dc^2*(angleds/360-sin(angleds*2*pi/360)/(2*pi));
972 Swt=Ntt*Ftw*pi/4*Dt^2;
973 Sw=Swg-Swt;
974 Res=ROs*vs*De/MUs;
975 [a1,a2,a3,a4,b1,b2,b3,b4]=parametrostablal(Res,layout(2),tablacoeff1);
976 a=a3/(1+0.14*Res^(a4));
977 b=b3/(1+0.14*Res^(b4));
978 ch=a1*(1.33*Dt/Ltp)^(a)*(ROs*Dt/MUs)^(a2);
979 cp=b1*(1.33*Dt/Ltp)^(b)*(ROs*Dt/MUs)^(b2);
980 Sm=Lbc*(Lbb+Dctl/Ltpe*(Ltp-Dt));
981 Nb=5;
982 Nb0=0;
983 while abs((Nb-Nb0)/Nb)>0.01
984     Nb0=Nb;
985 %CORRECTION FACTORS for heat transfer and pressure drop
986 [Jtot,Rb,Rs,Rl] = correctionfactors(Ftw,Dctl,Lbb,angleds,Dt,Bc,Ds,Dctl,Ntt,Ntcc,
Lpp,Lbc,Res,Nb,Sm);
987 Ks4=ch*(MUs/MUsw)^0.14*Prs^(-2/3)*ROs*Cps*Jtot;
988 C4=Ks4*(10^6*Ms/ROs)^(1+a2)*(Lbb+Dctl*(Ltp-Dt)/Ltpe)^(1+a2);
989 syms Ltaa;
990 Lta=1000;
991 options=optimset('Display','off');
992 if Ret<=2100
993     C6=1860*kt/Dt*(MUt/MUtw)^0.14*(Cpt*MUt/(kt*10^3))^(1/3)*(4*10^6*Mt)^(1/3)*
(m3*Dt)^(n/3)/(pi*MUt)^(1/3);
994     Lta=fsolve(@ (Ltaa) -Ltaa*(Ds-m1)^n+C5*(Ds^(1+a2)*Rbs^(1+a2)/C4+Ltaa^(1/3)*(Ds-
m1)^(n/3)/C6+C7),Lta,options);
995 else if Ret>10000
996     C10=27*kt/Dt*(Cpt*MUt/(10^3*kt))^(1/3)*(MUt/MUtw)^0.14*(4*10^6*Mt)^0.8*
(m3*Dt)^(0.8*n)*Ntp^0.8/(pi*Dti*MUt)^0.8;
997
998     else
999         C8=0.116*kt/Dt*(MUt/MUtw)^0.14*(Cpt*MUt/(kt*10^3))^(1/3);
1000         C9=(4*10^6*Mt)^(2/3)*(m3*Dt)^(2*n/3)/(pi*MUt*Dti)^(2/3);
1001         Lta=fsolve(@ (Ltaa) -Ltaa/(Ds-m1)^n+C5*(Ds^(1+a2)*Rbs^(1+a2)/C4+1/(C8*(1+
Dti/Ltaa)^(2/3)))*(C9/(Ds-m1)^(2*n/3)-125)+C7),Lta,options);
1002     end
1003 end
1004 hs=C4/(Rbs^(1+a2)*Ds^(1+a2));
1005 if Ret<=2100
1006     ht=1860*kt/Dti*(Ret*Prt*Dti/Lta)^(1/3)*(MUt/MUtw)^(0.14);
1007 else if Ret>10000
1008     ht=27*kt/Dti*Ret^0.8*Prt^(1/3)*(MUt/MUtw)^(0.14);

```



ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```

1009     else
1010         ht=116*(Ret^(2/3)-125)*Prt^(1/3)*(1+Dti/Lta)^(2/3)*(MUT/MUtw)^(0.14);
1011     end
1012 end
1013 Tw=Ttav+(Tsav-Ttav)/(1+ht/hs);
1014 [MUT,MUS,MUtw,MUsw] = viscosidades(MUtin,MUtin,MUtin,MUtin,Tw,Ttin,Ttout,Tsin,
Tsout,ROt,ROs);
1015 Prs=Cps*MUS/(10^3*ks);
1016 Prt=Cpt*MUT/(10^3*kt);
1017 Ltt=Lta+2*Lts;
1018 Nb=(Lta-Lbc*(Li+Lo))/Lbc+1;
1019 end
1020 if Res>=2100 %turbulento
1021 Ks1=(Sm/Sw)*((1+0.3*Ntcw)*Rl*Nb*ROs)/((Nb+1)*Ds);
1022 Ks2=((Nb-1)/(Nb+1)*Rl+(Ntcc+Ntcw)/(Ntcc*(Nb+1))*Rs)*(1-2*(Bc/100))*(2*Rb*ROs*cp)
/(MUS/MUsw)^-0.14*Lpp);
1023 Rp=-b2/(Ks1/(Ks2*vs^b2)+1);
1024 Ks3=Ks1*vs^Rp+Ks2*vs^(Rp+b2);
1025 else%laminar
1026 k1=(26*10^3*Nb*Rl*MUS)/((Nb+1)*Ds*sqrt(Sw/Sm))*(Ntcw/(Ltp-Dt)+Lbc/Dw^2);%que es Dw
1027 k2=Nb*Rl*ROs/((Nb+1)*Ds)*(Sm/Sw);
1028 k3=((Nb-1)*Rl/(Nb+1)+(Ntcc+Ntcw)*Rs/(Ntcc*(Nb+1)))*(1-2*(Bc/100))*(2*Rb*ROs*cp)/
((MUS/MUsw)^-0.14*Lpp);
1029 Rp=2-(k1+2*k2*vs+k3*(2+b2)*vs^(1+b2))/(k1+k2*vs+k3*vs^(1+b2));
1030 Ks3=(k1*vs^-1+k2+k3*vs^b2)*vs^Rp;%B15 no seguro si es exponente!!!
1031 end
1032 C3=((Nb+1)/((Nb-1)+(Li+Lo)))*(Ks3*4*Ns*Ms^(2-Rp))/(ROs*10^-6*(Lbb+Dctl*(Ltp-Dt)
/Ltpe))^(2-Rp);
1033 delPs=C3*Lta/(Rbs^(3-Rp)*Ds^(2-Rp));
1034 if delPs>delPsmax
1035 while delPs>delPsmax
1036     vs=vs-0.003;
1037 Lbc=10^6*Ms/(vs*ROs*(Lbb+Dctl/Ltpe*(Ltp-Dt)));
1038 Rbs=Lbc/Ds;
1039 anglectl=2*acos((Ds/Dctl)*(1-2*Bc/100))*360/(2*pi);
1040 Ftw= anglectl/360-sin(anglectl*2*pi/360)/(2*pi);
1041 if Ret<=2100
1042     ac=0.35;
1043     Kt=16;
1044     mt=-1;
1045 else if Ret>10^5
1046     ac=0.14;
1047     Kt=0.046;
1048     mt=-0.2;
1049     else
1050     ac=0.14;
1051     Kt=0.0791;
1052     mt=-0.25;
1053     end
1054 end
1055 Ntcw=0.8/Lpp*(Ds*(Bc/100));
1056 Ntcc=Ds/Lpp*(1-2*(Bc/100));
1057 C1=(2*Kt*Ntp^(3+mt)*Ns*(4*10^6*Mt)^(2+mt)*(m3*Dt)^(n*(2+mt)))/(ROt*MUT^mt)

```

# ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```
(MUt/MUtw)^(ac)*pi^(2+mt)*Dti^(5+mt));
1058 C2=1.25*Ntp^3*Ns*(4*10^6*Mt)^(2*(m3*Dt)^(2*n)/(ROt*pi^2*Dti^4));
1059 Swg=pi/4*Ds^2*(angleds/360-sin(angleds*2*pi/360)/(2*pi));
1060 Swt=Ntt*Ftw*pi/4*Dt^2;
1061 Sw=Swg-Swt;
1062 Res=ROs*vs*De/MUs;
1063 [a1,a2,a3,a4,b1,b2,b3,b4]=parametrostablal(Res,layout(2),tablacoeff1);
1064 a=a3/(1+0.14*Res^(a4));
1065 b=b3/(1+0.14*Res^(b4));
1066 ch=a1*(1.33*Dt/Ltp)^(a)*(ROs*Dt/MUs)^(a2);
1067 cp=b1*(1.33*Dt/Ltp)^(b)*(ROs*Dt/MUs)^(b2);
1068 Sm=Lbc*(Lbb+Dctl/Ltpe*(Ltp-Dt));
1069 Nb=5;Nb0=0;
1070 while abs((Nb-Nb0)/Nb)>0.01
1071 Nb0=Nb;
1072 %CORRECTION FACTORS for heat transfer and pressure drop
1073 [Jtot,Rb,Rs,Rl] = correctionfactors(Ftw,Dctl,Lbb,angleds,Dt,Bc,Ds,Dctl,Ntt,Ntcc,
Lpp,Lbc,Res,Nb,Sm);
1074 Ks4=ch*(MUs/MUsw)^0.14*Prs^(-2/3)*ROs*Cps*Jtot;
1075 C4=Ks4*(10^6*Ms/ROs)^(1+a2)*(Lbb+Dctl*(Ltp-Dt)/Ltpe)^-(1+a2);
1076 syms Ltaa;
1077 Lta=1000;
1078 options=optimset('Display','off');
1079 if Ret<=2100
1080 C6=1860*kt/Dt*(MUt/MUtw)^0.14*(Cpt*MU/(kt*10^3))^(1/3)*(4*10^6*Mt)^(1/3)*
(m3*Dt)^(n/3)/(pi*MU)^(1/3);
1081 Lta=fsolve(@ (Ltaa) -Ltaa*(Ds-m1)^n+C5*(Ds^(1+a2)*Rbs^(1+a2)/C4+Ltaa^(1/3)*(Ds-
m1)^(n/3)/C6+C7),Lta,options);
1082 else if Ret>10000
1083 C10=27*kt/Dt*(Cpt*MU/(10^3*kt))^(1/3)*(MUt/MUtw)^0.14*(4*10^6*Mt)^0.8*
(m3*Dt)^(0.8*n)*Ntp^0.8/(pi*Dti*MU)^(0.8);
1084 Lta=C5*(Ds^(1+a2)*Rbs^(1+a2)/C4+(Ds-m1)^(0.8*n)/C10+C7)/(Ds-m1)^n;
1085 else
1086 C8=0.116*kt/Dt*(MUt/MUtw)^0.14*(Cpt*MU/(kt*10^3))^(1/3);
1087 C9=(4*10^6*Mt)^(2/3)*(m3*Dt)^(2*n/3)/(pi*MU*Dti)^(2/3);
1088 Lta=fsolve(@ (Ltaa) -Ltaa/(Ds-m1)^n+C5*(Ds^(1+a2)*Rbs^(1+a2)/C4+1/(C8*(1+
Dti/Ltaa)^(2/3))*(C9/(Ds-m1)^(2*n/3)-125)+C7),Lta,options);
1089 end
1090 end
1091 hs=C4/(Rbs^(1+a2)*Ds^(1+a2));
1092 if Ret<=2100
1093 ht=1860*kt/Dti*(Ret*Prt*Dti/Lta)^(1/3)*(MUt/MUtw)^(0.14);
1094 else if Ret>10000
1095 ht=27*kt/Dti*Ret^0.8*Prt^(1/3)*(MUt/MUtw)^(0.14);
1096 else
1097 ht=116*(Ret^(2/3)-125)*Prt^(1/3)*(1+Dti/Lta)^(2/3)*(MUt/MUtw)^(0.14);
1098 end
1099 end
1100 Tw=Ttav+(Tsav-Ttav)/(1+ht/hs);
1101 [MUt,MUs,MUtw,MUsw] = viscosidades(MUtin,MUusin,MUtout,MUsout,Tw,Ttin,Ttout,Tsin,
Tsout,ROt,ROs);
1102 Prs=Cps*MUs/(10^3*ks);
1103 Prt=Cpt*MU/(10^3*kt);
```

ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```

1104 Ltt=Lta+2*Lts;
1105 Nb=(Lta-Lbc*(Li+Lo))/Lbc+1;
1106 end
1107 if Res>=2100 %turbulento
1108 Ks1=(Sm/Sw)*(1+0.3*Ntcw)*Rl*Nb*ROs/((Nb+1)*Ds);
1109 Ks2=((Nb-1)/(Nb+1)*Rl+(Ntcc+Ntcw)/(Ntcc*(Nb+1))*Rs)*(1-2*(Bc/100))*(2*Rb*ROs*cp)
/((MUs/MUsw)^-0.14*Lpp);
1110 Rp=-b2/(Ks1/(Ks2*vs^b2)+1);
1111 Ks3=Ks1*vs^Rp+Ks2*vs^(Rp+b2);
1112 else%laminar
1113 k1=(26*10^3*Nb*Rl*MUs)/((Nb+1)*Ds*sqrt(Sw/Sm))*(Ntcw/(Ltp-Dt)+Lbc/Dw^2);%que es Dw
1114 k2=Nb*Rl*ROs/((Nb+1)*Ds)*(Sm/Sw);
1115 k3=((Nb-1)*Rl/(Nb+1)+(Ntcc+Ntcw)*Rs/(Ntcc*(Nb+1)))*(1-2*(Bc/100))*(2*Rb*ROs*cp)/
((MUs/MUsw)^-0.14*Lpp);
1116 Rp=2-(k1+2*k2*vs+k3*(2+b2)*vs^(1+b2))/(k1+k2*vs+k3*vs^(1+b2));
1117 Ks3=(k1*vs^-1+k2+k3*vs^b2)*vs^Rp;%B15 no seguro si es exponente!!!
1118 end
1119 C3=((Nb+1)/((Nb-1)+(Li+Lo)))*(Ks3^4*Ns*Ms^(2-Rp))/(ROs*10^-6*(Lbb+Dctl*(Ltp-Dt)
/Ltpe))^(2-Rp);
1120 delPs=C3*Lta/(Rbs^(3-Rp)*Ds^(2-Rp));
1121 end
1122 delPt=C1*Ltt/(Ds-m1)^(n*(2+mt))+C2/(Ds-m1)^(2*n);
1123 A=pi*Dt*Lta*Ntt*Ns*10^-6;
1124 TAC=Af*(Ca+Cb*A^c+Ce+Cf*(Ms*delPs/ROs)^g+Ce+Cf*(Mt*delPt/ROt)^g)+Cpow*H/rend*
(Ms*delPs/ROs+Mt*delPt/ROt);
1125 else
1126 while delPs<delPsmax
1127 vs=vs+0.003;
1128 Lbc=10^6*Ms/(vs*ROs*(Lbb+Dctl/Ltpe*(Ltp-Dt)));
1129 Rbs=Lbc/Ds;
1130 anglectl=2*acos((Ds/Dctl)*(1-2*Bc/100))*360/(2*pi);
1131 Ftw= anglectl/360-sin(anglectl*2*pi/360)/(2*pi);
1132 if Ret<=2100
1133     ac=0.35;
1134     Kt=16;
1135     mt=-1;
1136 else if Ret>10^5
1137     ac=0.14;
1138     Kt=0.046;
1139     mt=-0.2;
1140     else
1141     ac=0.14;
1142     Kt=0.0791;
1143     mt=-0.25;
1144     end
1145 end
1146 Ntcw=0.8/Lpp*(Ds*(Bc/100));
1147 Ntcc=Ds/Lpp*(1-2*(Bc/100));
1148 C1=(2*Kt*Ntp^(3+mt)*Ns*(4*10^6*Mt)^(2+mt)*(m3*Dt)^(n*(2+mt)))/(ROt*MUt^mt*
(MUt/MUtw)^(ac)*pi^(2+mt)*Dti^(5+mt));
1149 C2=1.25*Ntp^3*Ns*(4*10^6*Mt)^2*(m3*Dt)^(2*n)/(ROt*pi^2*Dti^4);
1150 Swg=pi/4*Ds^2*(angleds/360-sin(angleds*2*pi/360)/(2*pi));
1151 Swt=Ntt*Ftw*pi/4*Dt^2;

```

ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```

1152 Sw=Swg-Swt;
1153 Res=ROs*vs*De/MUs;
1154 [a1,a2,a3,a4,b1,b2,b3,b4]=parametrostablal(Res,layout(2),tablacoeffl);
1155 a=a3/(1+0.14*Res^(a4));
1156 b=b3/(1+0.14*Res^(b4));
1157 ch=a1*(1.33*Dt/Ltp)^(a)*(ROs*Dt/MUs)^(a2);
1158 cp=b1*(1.33*Dt/Ltp)^(b)*(ROs*Dt/MUs)^(b2);
1159 Sm=Lbc*(Lbb+Dctl/Ltpe*(Ltp-Dt));
1160 Nb=5;Nb0=0;
1161 while abs((Nb-Nb0)/Nb)>0.01
1162 Nb0=Nb;
1163 %CORRECTION FACTORS for heat transfer and pressure drop
1164 [Jtot,Rb,Rs,Rl] = correctionfactors(Ftw,Dctl,Lbb,angleds,Dt,Bc,Ds,Dctl,Ntt,Ntcc,
Lpp,Lbc,Res,Nb,Sm);
1165 Ks4=ch*(MUs/MUsw)^0.14*Prs^(-2/3)*ROs*Cps*Jtot;
1166 C4=Ks4*(10^6*Ms/ROs)^(1+a2)*(Lbb+Dctl*(Ltp-Dt)/Ltpe)^-(1+a2);
1167 syms Ltaa;
1168 Lta=1000;
1169 options=optimset('Display','off');
1170 if Ret<=2100
1171     C6=1860*kt/Dt*(MUt/MUtw)^0.14*(Cpt*MUt/(kt*10^3))^(1/3)*(4*10^6*Mt)^(1/3)*
(m3*Dt)^(n/3)/(pi*MUt)^(1/3);
1172     Lta=fsolve(@ (Ltaa) -Ltaa*(Ds-m1)^n+C5*(Ds^(1+a2)*Rbs^(1+a2)/C4+Ltaa^(1/3)*(Ds-
m1)^(n/3)/C6+C7),Lta,options);
1173 else if Ret>10000
1174     C10=27*kt/Dt*(Cpt*MUt/(10^3*kt))^(1/3)*(MUt/MUtw)^0.14*(4*10^6*Mt)^0.8*
(m3*Dt)^(0.8*n)*Ntp^0.8/(pi*Dti*MUt)^0.8;
1175     Lta=C5*(Ds^(1+a2)*Rbs^(1+a2)/C4+(Ds-m1)^(0.8*n)/C10+C7)/(Ds-m1)^n;
1176 else
1177     C8=0.116*kt/Dt*(MUt/MUtw)^0.14*(Cpt*MUt/(kt*10^3))^(1/3);
1178     C9=(4*10^6*Mt)^(2/3)*(m3*Dt)^(2*n/3)/(pi*MUt*Dti)^(2/3);
1179     Lta=fsolve(@ (Ltaa) -Ltaa/(Ds-m1)^n+C5*(Ds^(1+a2)*Rbs^(1+a2)/C4+1/(C8*(1+
Dti/Ltaa)^(2/3))*(C9/(Ds-m1)^(2*n/3)-125)+C7),Lta,options);
1180 end
1181 end
1182 hs=C4/(Rbs^(1+a2)*Ds^(1+a2));
1183 if Ret<=2100
1184 ht=1860*kt/Dti*(Ret*Prt*Dti/Lta)^(1/3)*(MUt/MUtw)^(0.14);
1185 else if Ret>10000
1186 ht=27*kt/Dti*Ret^0.8*Prt^(1/3)*(MUt/MUtw)^(0.14);
1187 else
1188 ht=116*(Ret^(2/3)-125)*Prt^(1/3)*(1+Dti/Lta)^(2/3)*(MUt/MUtw)^(0.14);
1189 end
1190 end
1191 Tw=Ttav+(Tsav-Ttav)/(1+ht/hs);
1192 [MUt,MUs,MUtw,MUsw] = viscosidades(MUtin,MUusin,MUtout,MUsout,Tw,Ttin,Ttout,Tsin,
Tsout,ROt,ROs);
1193 Prs=Cps*MUs/(10^3*ks);
1194 Prt=Cpt*MUt/(10^3*kt);
1195 Ltt=Lta+2*Lts;
1196 Nb=(Lta-Lbc*(Li+Lo))/Lbc+1;
1197 end
1198 if Res>=2100 %turbulento

```

# ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```

1199 Ks1=(Sm/Sw)*(1+0.3*Ntcw)*Rl*Nb*ROs/((Nb+1)*Ds);
1200 Ks2=((Nb-1)/(Nb+1)*Rl+(Ntcc+Ntcw)/(Ntcc*(Nb+1))*Rs)*(1-2*(Bc/100))*(2*Rb*ROs*cp)
/((MUs/MUsw)^-0.14*Lpp);
1201 Rp=-b2/(Ks1/(Ks2*vs^b2)+1);
1202 Ks3=Ks1*vs^Rp+Ks2*vs^(Rp+b2);
1203 else%laminar
1204 k1=(26*10^3*Nb*Rl*MUs)/((Nb+1)*Ds*sqrt(Sw/Sm))*(Ntcw/(Ltp-Dt)+Lbc/Dw^2);%que es Dw
1205 k2=Nb*Rl*ROs/((Nb+1)*Ds)*(Sm/Sw);
1206 k3=((Nb-1)*Rl/(Nb+1)+(Ntcc+Ntcw)*Rs/(Ntcc*(Nb+1)))*(1-2*(Bc/100))*(2*Rb*ROs*cp)/
((MUs/MUsw)^-0.14*Lpp);
1207 Rp=2-(k1+2*k2*vs+k3*(2+b2)*vs^(1+b2))/(k1+k2*vs+k3*vs^(1+b2));
1208 Ks3=(k1*vs^-1+k2+k3*vs^b2)*vs^Rp;%B15 no seguro si es exponente!!!
1209 end
1210 C3=((Nb+1)/((Nb-1)+(Li+Lo)))*(Ks3^4*Ns*Ms^(2-Rp))/(ROs*10^-6*(Lbb+Dct1*(Ltp-Dt)
/Ltpe))^(2-Rp);
1211 delPs=C3*Lta/(Rbs^(3-Rp)*Ds^(2-Rp));
1212 end
1213 delPt=C1*Ltt/(Ds-m1)^(n*(2+mt))+C2/(Ds-m1)^(2*n);
1214 A=pi*Dt*Lta*Ntt*Ns*10^-6;
1215 TAC=Af*(Ca+Cb*A^c+Ce+Cf*(Ms*delPs/ROs)^g+Ce+Cf*(Mt*delPt/ROt)^g)+Cpow*H/rend*
(Ms*delPs/ROs+Mt*delPt/ROt);
1216 end
1217
1218                                     end
1219                                 end
1220                             end
1221                         end
1222                     end
1223                 end
1224             end
1225         end
1226 save valorpunto.mat delPt delPs A TAC Ltt Ds Rbs vs vt

```



## ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```

1 %TACminimo
2 %Una vez obtenidas las curvas que permiten representar el área factible, se
3 %puede calcular el intercambiador de mínimo coste que se encuentra en el
4 %interior de ese area y por tanto, cumple todas las restricciones.
5 %VARIABLES DE ENTRADA
6 %Bc es el corte del deflector
7 %Cps y Cpt son los calores específicos de ambos fluidos
8 %Dsmax es el diámetro máximo de la carcasa
9 %Lmax es la longitud máxima de los tubos
10 %Li y Lo son las separaciones de los deflectores a la entrada y a la salida
11 %MUsin, MUsout, MUsin y MUsout son las viscosidades de los fluidos a la
12 %temperatura de entrada y de salida
13 %Ms y Mt son los caudales máxicos para ambos fluidos
14 %ROs y ROt son las densidades de ambos fluidos
15 %Ntp son el número de pasos por los tubos
16 %Rfs y Rft son las resistencias de ensuciamiento para ambos fluidos
17 %Tsin, Tsout, Ttin y Ttout son las temperaturas de entrada y salida de los
18 %fluidos
19 %angle y forma determinan el layout de los tubos
20 %bundletype es el tipo de cabezal
21 %delPsmay y delPtmax son las pérdidas de carga máxicas admisibles en
22 %carcasa y tubos respectivamente
23 %ks y kt son las conductividades térmicas de los fluidos
24 %kw es la conductividad térmica del material de los tubos
25 %vsmay, vsmin, vtmax y vtmin son las velocidades límites para ambos fluidos
26 %VARIABLES INTERNAS DEL PROGRAMA
27 %Rbsmay y Rbsmin son la relación entre la separacion de los deflectores y
28 %el diámetro de la carcasa máxica y mínima
29 %Dt y Dti son el diámetro externo e interno de los tubos, respectivamente
30 %Ltp es la separación entre los tubos (tube pitch)
31 %Ns es el número de pasos por la carcasa
32 %SALIDA
33 %Se obtienen las características del intercambiador de mínimo coste que
34 %cumple con las restricciones
35 %delPt y delPs son la pérdida de carga en los tubos y en la carcasa,
36 %respectivamente
37 %A es el área en la que se produce intercambio de calor
38 %TAC es el coste total anualizado del intercambiador
39 %Ltt es la longitud de los tubos
40 %Ds es el diámetro de la carcasa
41 %Rbs es la relación entre la separacion de los deflectores y el diámetro de
42 %la carcasa
43 %vs y vt son las velocidades de los fluidos en la carcasa y en los tubos,
44 %respectivamente
45 %punto identifica la intersección de curvas en la que se obtiene el minimo
46 load variables
47 if Ttin>Tsin
48     Thi=Ttin;
49     Tho=Tto;
50     Tci=Tsin;
51     Tco=Tsout;
52 else
53     Thi=Tsin;

```

## ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```

54     Tho=Tsout;
55     Tci=Ttin;
56     Tco=Ttout;
57 end
58 Ttav=(Ttin+Ttout)/2;Tsav=(Tsin+Tsout)/2;
59 Rbsmax=1;
60 Rbsmin=0.2;
61 Dt=19.1;%mm
62 Dti=15.4;
63 Ltp=1.25*Dt;
64 layout=[forma angle];%
65 MUt=MUtin;%para empezar iteraciones
66 MUs=MUsin;
67 MUtw=MUtin;
68 MUsw=MUsin;
69
70 Prt=Cpt*MUt/(10^3*ks);
71 Prs=Cps*MUs/(10^3*ks);
72 Ns=1;
73 S=(Tco-Tci)/(Thi-Tci);
74 R=(Thi-Tho)/(Tco-Tci);
75 P=(1-((R*S-1)/(S-1))^(1/Ntp))/(R-((R*S-1)/(S-1))^(1/Ntp));
76 F=(sqrt(R^2+1)*log((1-P)/(1-R*P)))/((R-1)*log((2/P-1-R+sqrt(R^2+1))/(2/P-R-1-sqrt(R^2+1))));
77 while F<0.8
78     Ntp=Ntp+1;
79 P=(1-((R*S-1)/(S-1))^(1/Ntp))/(R-((R*S-1)/(S-1))^(1/Ntp));
80 F=(sqrt(R^2+1)*log((1-P)/(1-R*P)))/((R-1)*log((2/P-1-R+sqrt(R^2+1))/(2/P-R-1-sqrt(R^2+1))));
81 end
82 LMTD=((Thi-Tco)-(Tho-Tci))/log((Thi-Tco)/(Tho-Tci));
83 Q=Mt*abs(Ttin-Ttout)*Cpt;
84 if layout(1)==2 %diametro hidraulico equivalente shell-side
85     De=4*(Ltp^2-pi*Dt^2/4)/(pi*Dt);
86 else
87     De=4*(sqrt(3)*Ltp^2/4-pi*Dt^2/8)/(pi*Dt/2);
88 end
89 %TABLA A1 columnas (a1 a2 a3 a4 b1 b2 b3 b4) filas 30° Reynodls(10^5-10^4,10^4-10^3,10^3-10^2,
90 %10^2-10,<10) 45°(10^5...) 90°(10^5...)
0.9 0.97;-0.388 -0.388 -0.477 -0.657 -0.667 -0.396 -0.396 -0.5 -0.656 -0.667 -0.395
-0.266 -0.46 -0.631 -0.667;1.45 1.45 1.45 1.45 1.45 1.93 1.93 1.93 1.93 1.93 1.187
1.187 1.187 1.187 1.187;0.519 0.519 0.519 0.519 0.519 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.37 0.37
0.37 0.37 0.37; 0.372 0.486 4.57 45.1 48 0.303 0.333 3.5 26.2 32 0.391 0.0815 6.09 32.1
35; -0.123 -0.152 -0.476 -0.973 -1 -0.126 -0.136 -0.476 -0.913 -1 -0.148 0.022 -0.602
-0.963 -1;7 7 7 7 7 6.59 6.59 6.59 6.59 6.59 6.3 6.3 6.3 6.3 6.3; 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5
0.52 0.52 0.52 0.52 0.52 0.378 0.378 0.378 0.378 0.378 0.378]';
92 %TABLA 1
93 tablacoeffm=[8 39 44 87;0.01 0 0.025 0.007]';
94 %TABLA 2
95 tablacoeff2=[0.319 0.249 0.175 0.0743 0.0365;0.215 0.156 0.158 0.0402 0.0331;2.142
2.207 2.285 2.499 2.675;2.207 2.291 2.263 2.617 2.643]';

```

## ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```

96 %
97 [m1,m2]=parametrosm(tablacoefm,bundletype);
98 [K1,n]=parametrostaba2(layout,tablacoef2,Ntp);
99 %Cálculos geometría
100 if layout(2)==2
101     Ltpe=0.707*Ltp;
102     Lpp=0.707*Ltp;
103 else if layout(2)==1
104     Ltpe=Ltp;
105     Lpp=0.866*Ltp;
106     else
107         Lpp=Ltp;
108         Ltpe=Ltp;
109     end
110 end
111 angleds=2*acos(1-2*(Bc/100))*360/(2*pi);
112 m3=(m2+1)/K1^(1/n);
113 C5=Q*10^6*(m3*Dt)^n/(pi*Dt*Ns*F*LMTD);
114 C7=Dt*Rft/Dti+Dt*log(Dt/Dti)/(2*10^3*kw)+Rfs;
115 %coste
116 Ca=30000;
117 Cb=750;
118 c=0.81;
119 Ce=2000;
120 Cf=5;
121 g=0.68;
122 Cpow=0.00005;
123 H=8000;
124 Af=0.322;
125 rend=0.7;
126 puntomin=0;
127 TACmin=100000;
128
129 %Rbsmin vtmin
130 Rbs=Rbsmin;
131 vt=vtmin;
132 Ret=ROt*vt*Dti/MUt;
133 Ntt=fix(((4*10^6*Mt*Ntp)/(pi*vt*ROt*Dti^2)/Ntp)+1)*Ntp;
134 Ds=m1+m3*Dt*(Ntt)^(1/n);
135 Lts=0.1*Ds;
136 if Lts<25
137     Lts=25;
138 end
139 Dotl=Dt*(Ntt/K1)^(1/n);
140 Lbb=Ds-Dotl;
141 Dctl=Dotl-Dt;
142 anglectl=2*acos((Ds/Dctl)*(1-2*Bc/100))*360/(2*pi);
143 Ftw= anglectl/360-sin(anglectl*2*pi/360)/(2*pi);
144 if Ret<=2100
145     ac=0.35;
146     Kt=16;
147     mt=-1;
148 else if Ret>10^5

```



## ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```

149     ac=0.14;
150     Kt=0.046;
151     mt=-0.2;
152     else
153     ac=0.14;
154     Kt=0.0791;
155     mt=-0.25;
156     end
157 end
158 %
159 C1=(2*Kt*Ntp^(3+mt)*Ns*(4*10^6*Mt)^(2+mt)*(m3*Dt)^(n*(2+mt)))/(ROt*MUt^mt*
(MUt/MUtw)^(ac)*pi^(2+mt)*Dti^(5+mt));
160 C2=1.25*Ntp^3*Ns*(4*10^6*Mt)^2*(m3*Dt)^(2*n)/(ROt*pi^2*Dti^4);
161 Swg=pi/4*Ds^2*(angleds/360-sin(angleds*2*pi/360)/(2*pi));
162 Swt=Ntt*Ftw*pi/4*Dt^2;
163 Sw=Swg-Swt;
164 Lbc=Rbs*Ds;
165 Sm=Lbc*(Lbb+Dctl/Ltpe*(Ltp-Dt));
166 vs=Ms*10^6/(ROs*Sm);
167 Res=ROs*vs*De/MUs;
168 [a1,a2,a3,a4,b1,b2,b3,b4]=parametrostablal(Res,layout(2),tablacoeff1);
169 a=a3/(1+0.14*Res^(a4));
170 b=b3/(1+0.14*Res^(b4));
171 ch=a1*(1.33*Dt/Ltp)^(a)*(ROs*Dt/MUs)^(a2);
172 cp=b1*(1.33*Dt/Ltp)^(b)*(ROs*Dt/MUs)^(b2);
173 Ntcc=Ds/Lpp*(1-2*(Bc/100));
174 Ntcw=0.8/Lpp*(Ds*(Bc/100));
175 Nb=5;
176 Nb0=0;
177 while abs((Nb-Nb0)/Nb)>0.01
178 Nb0=Nb;
179 [Jtot,Rb,Rs,Rl] = correctionfactors(Ftw,Dctl,Lbb,angleds,Dt,Bc,Ds,Dctl,Ntt,Ntcc,
Lpp,Lbc,Res,Nb,Sm);
180 %Shell-side pressure drop, Cálculo Rp y C3
181 if Res>=2100 %turbulento
182 Ks1=(Sm/Sw)*((1+0.3*Ntcw)*Rl*Nb*ROs)/((Nb+1)*Ds);
183 Ks2=((Nb-1)/(Nb+1)*Rl+(Ntcc+Ntcw)/(Ntcc*(Nb+1))*Rs)*(1-2*(Bc/100))*(2*Rb*ROs*cp)
/((MUs/MUsw)^-0.14*Lpp);
184 Rp=-b2/(Ks1/(Ks2*vs^b2)+1);
185 Ks3=Ks1*vs^Rp+Ks2*vs^(Rp+b2);
186 else%laminar
187 Ntw=Ntt*Ftw;
188 Dw=4*Sw/(pi*Dt*Ntw+Ds*angleds/2);
189 k1=(26*10^3*Nb*Rl*MUs)/((Nb+1)*Ds*sqrt(Sw/Sm))*(Ntcw/(Ltp-Dt)+Lbc/Dw^2);
190 k2=Nb*Rl*ROs/((Nb+1)*Ds)*(Sm/Sw);
191 k3=((Nb-1)*Rl/(Nb+1)+(Ntcc+Ntcw)*Rs/(Ntcc*(Nb+1)))*(1-2*(Bc/100))*(2*Rb*ROs*cp)
/((MUs/MUsw)^-0.14*Lpp);
192 Rp=2-(k1+2*k2*vs+k3*(2+b2)*vs^(1+b2))/(k1+k2*vs+k3*vs^(1+b2));
193 Ks3=(k1*vs^-1+k2+k3*vs^b2)*vs^Rp;
194 end
195
196 C3=((Nb+1)/((Nb-1)+(Li+Lo)))*(Ks3*Ns*4*Ms^(2-Rp))/(ROs*10^-6*(Lbb+Dctl*(Ltp-Dt)
/Ltpe))^(2-Rp);

```

## ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```

197 Ks4=ch*(MUs/MUsw)^0.14*Prs^(-2/3)*ROs*Cps*Jtot;
198 C4=Ks4*(10^6*Ms/ROs)^(1+a2)*(Lbb+Dct1*(Ltp-Dt)/Ltpe)^-(1+a2);
199 syms Lta
200 options=optimset('Display','off');
201 Lta=1000;
202
203 if Ret<=2100
204     C6=1860*kt/Dt*(MUt/MUtw)^0.14*(Cpt*MUt/(kt*10^3))^(1/3)*(4*10^6*Mt)^(1/3)*
(m3*Dt)^(n/3)/(pi*MUt)^(1/3);
205     Lta=fsolve(@ (Ltaa) -Ltaa*(Ds-m1)^n+C5*(Ds^(1+a2)*Rbs^(1+a2)/C4+Ltaa^(1/3)*(Ds-
m1)^(n/3)/C6+C7),Lta,options);
206 else if Ret>10000
207     C10=27*kt/Dt*(Cpt*MUt/(10^3*kt))^(1/3)*(MUt/MUtw)^0.14*(4*10^6*Mt)^0.8*
(m3*Dt)^(0.8*n)*Ntp^0.8/(pi*Dti*MUt)^0.8;
208     Lta=C5*(Ds^(1+a2)*Rbs^(1+a2)/C4+(Ds-m1)^(0.8*n)/C10+C7)/(Ds-m1)^n;
209 else
210     C8=0.116*kt/Dt*(MUt/MUtw)^0.14*(Cpt*MUt/(kt*10^3))^(1/3);
211     C9=(4*10^6*Mt)^(2/3)*(m3*Dt)^(2*n/3)/(pi*MUt*Dti)^(2/3);
212     Lta=fsolve(@ (Ltaa) -Ltaa*(Ds-m1)^n+C5*(Ds^(1+a2)*Rbs^(1+a2)/C4+1/(C8*(1+
Dti/Ltaa)^(2/3))*(C9/(Ds-m1)^(2*n/3)-125)+C7),Lta,options);
213 end
214 end
215 hs=C4/(Rbs^(1+a2)*Ds^(1+a2));
216 Prs=Cps*MUs/(10^3*ks);
217 Prt=Cpt*MUt/(10^3*kt);
218 if Ret<=2100
219 ht=1860*kt/Dti*(Ret*Prt*Dti/Lta)^(1/3)*(MUt/MUtw)^(0.14);
220 else if Ret>10000
221 ht=27*kt/Dti*Ret^0.8*Prt^(1/3)*(MUt/MUtw)^(0.14);
222 else
223 ht=116*(Ret^(2/3)-125)*Prt^(1/3)*(1+Dti/Lta)^(2/3)*(MUt/MUtw)^(0.14);
224 end
225 end
226 Tw=Ttav+(Tsav-Ttav)/(1+ht/hs);
227 [MUt,MUs,MUtw,MUsw] = viscosidades(MUtin,MUusin,MUtout,MUsout,Tw,Ttin,Ttout,Tsin,
Tsout,ROt,ROs);
228 Ltt=Lta+2*Lts;
229 Nb=(Lta-Lbc*(Li+Lo))/Lbc+1;
230 end
231
232 delPs=C3*Lta/(Rbs^(3-Rp)*Ds^(2-Rp));
233 delPt=C1*Ltt/(Ds-m1)^(n*(2+mt))+C2/(Ds-m1)^(2*n);
234 if (Ltt<=Lmax && Ds<=Dsmax && vt<=vtmax && vt>=vtmin && vs<=vsmax && vs>=vsmin &&
Rbs<=Rbsmax && Rbs>=Rbsmin && delPt<=delPtmax && delPs<=delPsmax)
235     A=pi*Dt*Lta*Ntt*Ns*10^-6;
236     TAC=Af*(Ca+Cb*A^c+Ce+Cf*(Ms*delPs/ROs)^g+Ce+Cf*(Mt*delPt/ROt)^g)+Cpow*H/rend*
(Ms*delPs/ROs+Mt*delPt/ROt);
237 TACmin=TAC;
238 puntomin=1;
239 save valorpunto.mat delPt delPs A TAC Ltt Ds Rbs vs vt
240 end
241 %Para Rbsmin y Dsmax
242 Rbs=Rbsmin;

```

## ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```

243 Ds=Dsmax;
244 Lbc=Rbs*Ds;
245 Ntt=((Ds-m1)/(m3*Dt))^n;
246 Dotl=Dt*(Ntt/K1)^(1/n);
247 Lbb=Ds-Dotl;
248 Dctl=Dotl-Dt;
249 anglectl=2*acos((Ds/Dctl)*(1-2*Bc/100))*360/(2*pi);
250 Ftw= anglectl/360-sin(anglectl*2*pi/360)/(2*pi);
251 Swg=pi/4*Ds2*(angleds/360-sin(angleds*2*pi/360)/(2*pi));
252 Swt=Ntt*Ftw*pi/4*Dt2;
253 Sw=Swg-Swt;
254 Sm=Lbc*(Lbb+Dctl/Ltpe*(Ltp-Dt));
255 vs=Ms*106/(ROs*Sm);
256 Res=ROs*vs*De/MUs;%De en mm
257 [a1,a2,a3,a4,b1,b2,b3,b4]=parametrostablal(Res,layout(2),tablacoeff1);
258 a=a3/(1+0.14*Res(a4));
259 b=b3/(1+0.14*Res(b4));
260 ch=a1*(1.33*Dt/Ltp)(a)*(ROs*Dt/MUs)(a2);
261 cp=b1*(1.33*Dt/Ltp)(b)*(ROs*Dt/MUs)(b2);
262 Lts=0.1*Ds;
263 if Lts<25
264     Lts=25;
265 end
266 Ntcc=Ds/Lpp*(1-2*(Bc/100));
267 vt=4*106*Mt*Ntp/(pi*ROt*Dti2*Ntt);
268 Ret=ROt*vt*Dti/MUt;
269 if Ret<=2100
270     ac=0.35;
271     Kt=16;
272     mt=-1;
273 else if Ret>105
274     ac=0.14;
275     Kt=0.046;
276     mt=-0.2;
277 else
278     ac=0.14;
279     Kt=0.0791;
280     mt=-0.25;
281 end
282 end
283 C1=(2*Kt*Ntp(3+mt)*Ns*(4*106*Mt)(2+mt)*(m3*Dt)(n*(2+mt))/(ROt*MUtmt*
(MUt/MUtw)(ac)*pi(2+mt)*Dti(5+mt));
284 C2=1.25*Ntp3*Ns*(4*106*Mt)2*(m3*Dt)(2*n)/(ROt*pi2*Dti4);
285 Ntcw=0.8/Lpp*(Ds*(Bc/100));
286
287 Nb=5;
288 Nb0=0;
289 while abs((Nb-Nb0)/Nb)>0.01
290     Nb0=Nb;
291 [Jtot,Rb,Rs,Rl] = correctionfactors(Ftw,Dctl,Lbb,angleds,Dt,Bc,Ds,Dotl,Ntt,Ntcc,
Lpp,Lbc,Res,Nb,Sm);
292 Ks4=ch*(MUs/MUsw)0.14*Prs(-2/3)*ROs*Cps*Jtot;
293 C4=Ks4*(106*Ms/ROs)(1+a2)*(Lbb+Dctl*(Ltp-Dt)/Ltpe)-(1+a2);

```

## ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```

294 syms Lta
295 options=optimset('Display','off');
296 Lta=1000;
297 if Ret<=2100
298     C6=1860*kt/Dt*(MUt/MUtw)^0.14*(Cpt*MUt/(kt*10^3))^(1/3)*(4*10^6*Mt)^(1/3)*
(m3*Dt)^(n/3)/(pi*MUt)^(1/3);
299     Lta=fsolve(@(Ltaa) -Ltaa*(Ds-m1)^n+C5*(Ds^(1+a2)*Rbs^(1+a2)/C4+Ltaa^(1/3)*(Ds-
m1)^(n/3)/C6+C7),Lta,options);
300 else if Ret>10000
301     C10=27*kt/Dt*(Cpt*MUt/(10^3*kt))^(1/3)*(MUt/MUtw)^0.14*(4*10^6*Mt)^0.8*
(m3*Dt)^(0.8*n)*Ntp^0.8/(pi*Dti*MUt)^0.8;
302     Lta=C5*(Ds^(1+a2)*Rbs^(1+a2)/C4+(Ds-m1)^(0.8*n)/C10+C7)/(Ds-m1)^n;
303 else
304     C8=0.116*kt/Dt*(MUt/MUtw)^0.14*(Cpt*MUt/(kt*10^3))^(1/3);
305     C9=(4*10^6*Mt)^(2/3)*(m3*Dt)^(2*n/3)/(pi*MUt*Dti)^(2/3);
306     Lta=fsolve(@(Ltaa) -Ltaa*(Ds-m1)^n+C5*(Ds^(1+a2)*Rbs^(1+a2)/C4+1/(C8*(1+
Dti/Ltaa)^(2/3))*(C9/(Ds-m1)^(2*n/3)-125)+C7),Lta,options);
307 end
308 end
309 hs=C4/(Rbs^(1+a2)*Ds^(1+a2));
310 Prs=Cps*MUs/(10^3*ks);
311 Prt=Cpt*MUt/(10^3*kt);
312 if Ret<=2100
313 ht=1860*kt/Dti*(Ret*Prt*Dti/Lta)^(1/3)*(MUt/MUtw)^(0.14);
314 else if Ret>10000
315 ht=27*kt/Dti*Ret^0.8*Prt^(1/3)*(MUt/MUtw)^(0.14);
316 else
317 ht=116*(Ret^(2/3)-125)*Prt^(1/3)*(1+Dti/Lta)^(2/3)*(MUt/MUtw)^(0.14);
318 end
319 end
320 Tw=Ttav+(Tsav-Ttav)/(1+ht/hs);
321 [MUt,MUs,MUtw,MUsw] = viscosidades(MUtin,MUsin,MUtout,MUsout,Tw,Ttin,Ttout,Tsin,
Tsout,ROt,ROs);
322 Ltt=Lta+2*Lts;
323 Nb=(Lta-Lbc*(Li+Lo))/Lbc+1;
324 end
325 if Res>=2100 %turbulento
326 Ks1=(Sm/Sw)*((1+0.3*Ntcw)*Rl*Nb*ROs)/((Nb+1)*Ds);
327 Ks2=((Nb-1)/(Nb+1)*Rl+(Ntcc+Ntcw)/(Ntcc*(Nb+1))*Rs)*(1-2*(Bc/100))*(2*Rb*ROs*cp)
/((MUs/MUsw)^-0.14*Lpp);
328 Rp=-b2/(Ks1/(Ks2*vs^b2)+1);
329 Ks3=Ks1*vs^Rp+Ks2*vs^(Rp+b2);
330 else%laminar
331 k1=(26*10^3*Nb*Rl*MUs)/((Nb+1)*Ds*sqrt(Sw/Sm))*(Ntcw/(Ltp-Dt)+Lbc/Dw^2);%que es Dw
332 k2=Nb*Rl*ROs/((Nb+1)*Ds)*(Sm/Sw);
333 k3=((Nb-1)*Rl/(Nb+1)+(Ntcc+Ntcw)*Rs/(Ntcc*(Nb+1)))*(1-2*(Bc/100))*(2*Rb*ROs*cp)
/((MUs/MUsw)^-0.14*Lpp);
334 Rp=2-(k1+2*k2*vs+k3*(2+b2)*vs^(1+b2))/(k1+k2*vs+k3*vs^(1+b2));
335 Ks3=(k1*vs^-1+k2+k3*vs^b2)*vs^Rp;%B15 no seguro si es exponente!!!
336 end
337 C3=((Nb+1)/((Nb-1)+(Li+Lo)))*(Ks3*Ns*4*Ms^(2-Rp))/(ROs*10^-6*(Lbb+Dctl*(Ltp-Dt)
/Ltpe))^(2-Rp);
338 delPs=C3*Lta/(Rbs^(3-Rp)*Ds^(2-Rp));

```

## ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```

339 delPt=C1*Ltt/(Ds-m1)^(n*(2+mt))+C2/(Ds-m1)^(2*n);
340 if (Ltt<=Lmax && Ds<=Dsmax && vt<=vtmax && vt>=vtmin && vs<=vsmax && vs>=vsmin && Rbs<=Rbsmax && Rbs>=Rbsmin && delPt<=delPtmax && delPs<=delPsmax)
341 A=pi*Dt*Lta*Ntt*Ns*10^-6;
342 TAC=Af*(Ca+Cb*A^c+Ce+Cf*(Ms*delPs/ROs)^g+Ce+Cf*(Mt*delPt/ROt)^g)+Cpow*H/rend*
(Ms*delPs/ROs+Mt*delPt/ROt);
343 if TAC<TACmin
344     TACmin=TAC;
345     puntomin=2;
346     save valorpunto.mat delPt delPs A TAC Ltt Ds Rbs vs vt
347 end
348 end
349 %vtmin vsmax
350 vt=vtmin;
351 vs=vsmax;
352 Ret=ROt*vt*Dti/MUt;
353 Ntt=fix(((4*10^6*Mt*Ntp)/(pi*vt*ROt*Dti^2)/Ntp)+1)*Ntp;
354 Ds=m1+m3*Dt*(Ntt)^(1/n);
355 Lts=0.1*Dts;
356 if Lts<25
357     Lts=25;
358 end
359 Dotl=Dt*(Ntt/K1)^(1/n);
360 Lbb=Ds-Dotl;
361 Dctl=Dotl-Dt;
362 Lbc=10^6*Ms/(vs*ROs*(Lbb+Dctl/Ltpe*(Ltp-Dt)));
363 Rbs=Lbc/Ds;
364 anglectl=2*acos((Ds/Dctl)*(1-2*Bc/100))*360/(2*pi);
365 Ftw= anglectl/360-sin(anglectl*2*pi/360)/(2*pi);
366 if Ret<=2100
367     ac=0.35;
368     Kt=16;
369     mt=-1;
370 else if Ret>10^5
371     ac=0.14;
372     Kt=0.046;
373     mt=-0.2;
374 else
375     ac=0.14;
376     Kt=0.0791;
377     mt=-0.25;
378 end
379 end
380 %
381 Ntcw=0.8/Lpp*(Ds*(Bc/100));
382 Ntcc=Ds/Lpp*(1-2*(Bc/100));
383 C1=(2*Kt*Ntp^(3+mt)*Ns*(4*10^6*Mt)^(2+mt)*(m3*Dt)^(n*(2+mt)))/(ROt*MUt^mt*
(MUt/MUt^w)^(ac)*pi^(2+mt)*Dti^(5+mt));
384 C2=1.25*Ntp^3*Ns*(4*10^6*Mt)^2*(m3*Dt)^(2*n)/(ROt*pi^2*Dti^4);
385 Swg=pi/4*Dts^2*(angleds/360-sin(angleds*2*pi/360)/(2*pi));
386 Swt=Ntt*Ftw*pi/4*Dt^2;
387 Sw=Swg-Swt;
388 Res=ROs*vs*De/MUs;

```

## ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```

389 [a1,a2,a3,a4,b1,b2,b3,b4]=parametrostablal(Res,layout(2),tablacoeef1);
390 a=a3/(1+0.14*Res^(a4));
391 b=b3/(1+0.14*Res^(b4));
392 ch=a1*(1.33*Dt/Ltp)^(a)*(ROs*Dt/MUs)^(a2);
393 cp=b1*(1.33*Dt/Ltp)^(b)*(ROs*Dt/MUs)^(b2);
394 Sm=Lbc*(Lbb+Dctl/Ltpe*(Ltp-Dt));
395 Nb=5;
396 Nb0=0;
397 while abs((Nb-Nb0)/Nb)>0.01
398 Nb0=Nb;
399 %CORRECTION FACTORS for heat transfer and pressure drop
400 [Jtot,Rb,Rs,Rl] = correctionfactors(Ftw,Dctl,Lbb,angleds,Dt,Bc,Ds,Dctl,Ntt,Ntcc,
Lpp,Lbc,Res,Nb,Sm);
401 Ks4=ch*(MUs/MUsw)^0.14*Prs^(-2/3)*ROs*Cps*Jtot;
402 C4=Ks4*(10^6*Ms/ROs)^(1+a2)*(Lbb+Dctl*(Ltp-Dt)/Ltpe)^-(1+a2);
403 syms Ltaa;
404 Lta=1000;
405 options=optimset('Display','off');
406 if Ret<=2100
407     C6=1860*kt/Dt*(MUt/MUtw)^0.14*(Cpt*MUt/(kt*10^3))^(1/3)*(4*10^6*Mt)^(1/3)*
(m3*Dt)^(n/3)/(pi*MUt)^(1/3);
408     Lta=fsolve(@(Ltaa) -Ltaa*(Ds-m1)^n+C5*(Ds^(1+a2)*Rbs^(1+a2)/C4+Ltaa^(1/3)*(Ds-
m1)^(n/3)/C6+C7),Lta,options);
409 else if Ret>10000
410     C10=27*kt/Dt*(Cpt*MUt/(10^3*kt))^(1/3)*(MUt/MUtw)^0.14*(4*10^6*Mt)^0.8*
(m3*Dt)^(0.8*n)*Ntp^0.8/(pi*Dti*MUt)^0.8;
411     Lta=C5*(Ds^(1+a2)*Rbs^(1+a2)/C4+(Ds-m1)^(0.8*n)/C10+C7)/(Ds-m1)^n;
412 else
413     C8=0.116*kt/Dt*(MUt/MUtw)^0.14*(Cpt*MUt/(kt*10^3))^(1/3);
414     C9=(4*10^6*Mt)^(2/3)*(m3*Dt)^(2*n/3)/(pi*MUt*Dti)^(2/3);
415     Lta=fsolve(@(Ltaa) -Ltaa/(Ds-m1)^n+C5*(Ds^(1+a2)*Rbs^(1+a2)/C4+1/(C8*(1+
Dti/Ltaa)^(2/3))*(C9/(Ds-m1)^(2*n/3)-125)+C7),Lta,options);
416 end
417 end
418 hs=C4/(Rbs^(1+a2)*Ds^(1+a2));
419 Prs=Cps*MUs/(10^3*ks);
420 Prt=Cpt*MUt/(10^3*kt);
421 if Ret<=2100
422 ht=1860*kt/Dti*(Ret*Prt*Dti/Lta)^(1/3)*(MUt/MUtw)^(0.14);
423 else if Ret>10000
424     ht=116*(Ret^(2/3)-125)*Prt^(1/3)*(1+Dti/Lta)^(2/3)*(MUt/MUtw)^(0.14);
425 else
426     ht=116*(Ret^(2/3)-125)*Prt^(1/3)*(1+Dti/Lta)^(2/3)*(MUt/MUtw)^(0.14);
427 end
428 end
429 Tw=Ttav+(Tsav-Ttav)/(1+ht/hs);
430 [MUt,MUs,MUtw,MUsw] = viscosidades(MUtin,MUsin,MUtout,MUsout,Tw,Ttin,Ttout,Tsin,
Tsout,ROT,ROs);
431 Ltt=Lta+2*Lts;
432 Nb=(Lta-Lbc*(Li+Lo))/Lbc+1;
433 end
434 if Res>=2100 %turbulento
435 Ks1=(Sm/Sw)*((1+0.3*Ntcw)*Rl*Nb*ROs)/((Nb+1)*Ds);

```

## ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```

436 Ks2=((Nb-1)/(Nb+1)*Rl+((Ntcc+Ntcw)/(Ntcc*(Nb+1))*Rs))*(1-2*(Bc/100))*(2*Rb*ROs*cp)
/((MUs/MUsw)^-0.14*Lpp);
437 Rp=-b2/(Ks1/(Ks2*vs^b2)+1);
438 Ks3=Ks1*vs^Rp+Ks2*vs^(Rp+b2);
439 else%laminar
440 k1=(26*10^3*Nb*Rl*MUs)/((Nb+1)*Ds*sqrt(Sw/Sm))*(Ntcw/(Ltp-Dt)+Lbc/Dw^2);%que es Dw
441 k2=Nb*Rl*ROs/((Nb+1)*Ds)*(Sm/Sw);
442 k3=((Nb-1)*Rl/(Nb+1)+(Ntcc+Ntcw)*Rs/(Ntcc*(Nb+1)))*(1-2*(Bc/100))*(2*Rb*ROs*cp)/
((MUs/MUsw)^-0.14*Lpp);
443 Rp=2-(k1+2*k2*vs+k3*(2+b2)*vs^(1+b2))/(k1+k2*vs+k3*vs^(1+b2));
444 Ks3=(k1*vs^-1+k2+k3*vs^b2)*vs^Rp;%B15 no seguro si es exponente!!!
445 end
446 C3=((Nb+1)/((Nb-1)+(Li+Lo)))*(Ks3*Ns^4*Ms^(2-Rp))/(ROs*10^-6*(Lbb+Dctl*(Ltp-Dt)
/Ltpe))^(2-Rp);
447 delPs=C3*Lta/(Rbs^(3-Rp)*Ds^(2-Rp));
448 delPt=C1*Ltt/(Ds-m1)^(n*(2+mt))+C2/(Ds-m1)^(2*n);
449 if (Ltt<=Lmax && Ds<=Dsmax && vt<=vtmax && vt>=vtmin && vs<=vsmax && vs>=vsmin &&
Rbs<=Rbsmax && Rbs>=Rbsmin && delPt<=delPtmax && delPs<=delPsmx)
450 A=pi*Dt*Lta*Ntt*Ns*10^-6;
451 TAC=Af*(Ca+Cb*A^c+Ce+Cf*(Ms*delPs/ROs)^g+Ce+Cf*(Mt*delPt/ROt)^g)+Cpow*H/rend*
(Ms*delPs/ROs+Mt*delPt/ROt);
452 if TAC<TACmin
453     TACmin=TAC;
454     puntomin=3;
455     save valorpunto.mat delPt delPs A TAC Ltt Ds Rbs vs vt
456 end
457 end
458 %vsmax Dsmax
459 vs=vsmax;
460 Ds=Dsmax;
461 Res=ROs*vs*De/MUs;
462 [a1,a2,a3,a4,b1,b2,b3,b4]=parametrostablal(Res,layout(2),tablacoeff1);
463 a=a3/(1+0.14*Res^(a4));
464 b=b3/(1+0.14*Res^(b4));
465 ch=a1*(1.33*Dt/Ltp)^(a)*(ROs*Dt/MUs)^(a2);
466 cp=b1*(1.33*Dt/Ltp)^(b)*(ROs*Dt/MUs)^(b2);
467 Ntt=((Ds-m1)/(m3*Dt))^n;
468 Dotl=Dt*(Ntt/K1)^(1/n);
469 Lbb=Ds-Dotl;
470 Dctl=Dotl-Dt;
471 Lbc=10^6*Ms/(vs*ROs*(Lbb+Dctl/Ltpe*(Ltp-Dt)));
472 Rbs=Lbc/Ds;
473 anglectl=2*acos((Ds/Dctl)*(1-2*Bc/100))*360/(2*pi);
474 Ftw= anglectl/360-sin(anglectl*2*pi/360)/(2*pi);
475 Swg=pi/4*Ds^2*(angleds/360-sin(angleds*2*pi/360)/(2*pi));
476 Swt=Ntt*Ftw*pi/4*Dt^2;
477 Sw=Swg-Swt;
478 Ntcc=Ds/Lpp*(1-2*(Bc/100));
479 Ntcw=0.8/Lpp*(Ds*(Bc/100));
480 vt=4*10^6*Mt*Ntp/(pi*ROt*Dti^2*Ntt);
481 Ret=ROt*vt*Dti/MU;
482 if Ret<=2100
483     ac=0.35;

```

## ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```

484     Kt=16;
485     mt=-1;
486     else if Ret>10^5
487         ac=0.14;
488         Kt=0.046;
489         mt=-0.2;
490     else
491         ac=0.14;
492         Kt=0.0791;
493         mt=-0.25;
494     end
495 end
496 C1=(2*Kt*Ntp^(3+mt)*Ns*(4*10^6*Mt)^(2+mt)*(m3*Dt)^(n*(2+mt)))/(ROt*MUt^mt*
(MUt/MUtw)^(ac)*pi^(2+mt)*Dti^(5+mt));
497 C2=1.25*Ntp^3*Ns*(4*10^6*Mt)^2*(m3*Dt)^(2*n)/(ROt*pi^2*Dti^4);
498 Sm=Lbc*(Lbb+Dctl/Ltpe*(Ltp-Dt));
499 Nb=5;
500 Nb0=0;
501 while abs((Nb-Nb0)/Nb)>0.01
502     Nb0=Nb;
503     [Jtot,Rb,Rs,Rl] = correctionfactors(Ftw,Dctl,Lbb,angleds,Dt,Bc,Ds,Dctl,Ntt,Ntcc,
Lpp,Lbc,Res,Nb,Sm);
504     Ks4=ch*(MUs/MUsw)^0.14*Prs^(-2/3)*ROs*Cps*Jtot;
505     C4=Ks4*(10^6*Ms/ROs)^(1+a2)*(Lbb+Dctl*(Ltp-Dt)/Ltpe)^-(1+a2);
506
507     syms Ltaa;
508     Lta=1000;
509     options=optimset('Display','off');
510     if Ret<=2100
511         C6=1860*kt/Dt*(MUt/MUtw)^0.14*(Cpt*MUt/(kt*10^3))^(1/3)*(4*10^6*Mt)^(1/3)*
(m3*Dt)^(n/3)/(pi*MUt)^(1/3);
512         Lta=fsolve(@(Ltaa) -Ltaa*(Ds-m1)^n+C5*(Ds^(1+a2)*Rbs^(1+a2)/C4+Ltaa^(1/3)*(Ds-
m1)^(n/3)/C6+C7),Lta,options);
513     else if Ret>10000
514         C10=27*kt/Dt*(Cpt*MUt/(10^3*kt))^(1/3)*(MUt/MUtw)^0.14*(4*10^6*Mt)^0.8*
(m3*Dt)^(0.8*n)*Ntp^0.8/(pi*Dti*MUt)^0.8;
515         Lta=C5*(Ds^(1+a2)*Rbs^(1+a2)/C4+(Ds-m1)^(0.8*n)/C10+C7)/(Ds-m1)^n;
516     else
517         C8=0.116*kt/Dt*(MUt/MUtw)^0.14*(Cpt*MUt/(kt*10^3))^(1/3);
518         C9=(4*10^6*Mt)^(2/3)*(m3*Dt)^(2*n/3)/(pi*MUt*Dti)^(2/3);
519         Lta=fsolve(@(Ltaa) -Ltaa*(Ds-m1)^(2*n/3)+C8*(Ds-m1)^(2*n/3)+C9*(Ds-m1)^(2*n/3)-125),Lta,options);
520     end
521 end
522 hs=C4/(Rbs^(1+a2)*Ds^(1+a2));
523 Prs=Cps*MUs/(10^3*ks);
524 Prt=Cpt*MUt/(10^3*kt);
525 if Ret<=2100
526     ht=1860*kt/Dti*(Ret*Prt*Dti/Lta)^(1/3)*(MUt/MUtw)^(0.14);
527 else if Ret>10000
528     ht=27*kt/Dti*Ret^0.8*Prt^(1/3)*(MUt/MUtw)^(0.14);
529 else
530     ht=116*(Ret^(2/3)-125)*Prt^(1/3)*(1+Dti/Lta)^(2/3)*(MUt/MUtw)^(0.14);

```



## ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```

531     end
532 end
533 Tw=Ttav+(Tsav-Ttav)/(1+ht/hs);
534 [MUT,MUS,MUtw,MUsw] = viscosidades(MUtin,MUtin,MUtin,MUtin,Tw,Ttin,Ttout,Tsin,
Tsout,ROt,ROs);
535 Lts=0.1*Ds;
536 if Lts<25
537     Lts=25;
538 end
539 Ltt=Lta+2*Lts;
540 Nb=(Lta-Lbc*(Li+Lo))/Lbc+1;
541 end
542 if Res>=2100 %turbulento
543 Ks1=(Sm/Sw)*((1+0.3*Ntcw)*Rl*Nb*ROs)/((Nb+1)*Ds);
544 Ks2=((Nb-1)/(Nb+1)*Rl+((Ntcc+Ntcw)/(Ntcc*(Nb+1))*Rs))*(1-2*(Bc/100))*(2*Rb*ROs*cp)
/((MUS/MUsw)^-0.14*Lpp);
545 Rp=-b2/(Ks1/(Ks2*vs^b2)+1);
546 Ks3=Ks1*vs^Rp+Ks2*vs^(Rp+b2);
547 else%laminar
548 Ntw=Ntt*Ftw;
549 Dw=4*Sw/(pi*Dt*Ntw+Ds*angleds/2);
550 k1=(26*10^3*Nb*Rl*MUS)/((Nb+1)*Ds*sqrt(Sw/Sm))*Ntcw/(Ltp-Dt)+Lbc/Dw^2);
551 k2=Nb*Rl*ROs/((Nb+1)*Ds)*(Sm/Sw);
552 k3=((Nb-1)*Rl/(Nb+1)+(Ntcc+Ntcw)*Rs/(Ntcc*(Nb+1)))*(1-2*(Bc/100))*(2*Rb*ROs*cp)
/((MUS/MUsw)^-0.14*Lpp);
553 Rp=2-(k1+2*k2*vs+k3*(2+b2)*vs^(1+b2))/(k1+k2*vs+k3*vs^(1+b2));
554 Ks3=(k1*vs^-1+k2+k3*vs^b2)*vs^Rp;
555 end
556 C3=((Nb+1)/((Nb-1)+(Li+Lo)))*(Ks3*Ns^4*Ms^(2-Rp))/(ROs*10^-6*(Lbb+Dct1*(Ltp-Dt)
/Ltpe))^(2-Rp);
557 delPs=C3*Lta/(Rbs^(3-Rp)*Ds^(2-Rp));
558 delPt=C1*Ltt/(Ds-m1)^(n*(2+mt))+C2/(Ds-m1)^(2*n);
559 if (Ltt<=Lmax && Ds<=Dsmax && vt<=vtmax && vt>=vtmin && vs<=vsmax && vs>=vsmin &&
Rbs<=Rbsmax && Rbs>=Rbsmin && delPt<=delPtmax && delPs<=delPsmax)
560 A=pi*Dt*Lta*Ntt*Ns*10^-6;
561 TAC=Af*(Ca+Cb*A^c+Ce+Cf*(Ms*delPs/ROs)^g+Ce+Cf*(Mt*delPt/ROt)^g)+Cpow*H/rend*
(Ms*delPs/ROs+Mt*delPt/ROt);
562 if TAC<TACmin
563     TACmin=TAC;
564     puntomin=4;
565     save valorpunto.mat delPt delPs A TAC Ltt Ds Rbs vs vt
566 end
567 end
568 %Rbsmin vtmax
569 Rbs=Rbsmin;
570 vt=vtmax;
571 Ret=ROt*vt*Dti/MUT;%Dti en mm
572 Ntt=fix(((4*10^6*Mt*Ntp)/(pi*vt*ROt*Dti^2)/Ntp)+1)*Ntp;
573 Ds=m1+m3*Dt*(Ntt)^(1/n);
574 Lts=0.1*Ds;
575 if Lts<25
576     Lts=25;
577 end

```

## ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```

578 Dotl=Dt*(Ntt/K1)^(1/n);
579 Lbb=Ds-Dotl;
580 Dctl=Dotl-Dt;
581 anglectl=2*acos((Ds/Dctl)*(1-2*Bc/100))*360/(2*pi);
582 Ftw= anglectl/360-sin(anglectl*2*pi/360)/(2*pi);
583 if Ret<=2100
584     ac=0.35;
585     Kt=16;
586     mt=-1;
587 else if Ret>10^5
588     ac=0.14;
589     Kt=0.046;
590     mt=-0.2;
591 else
592     ac=0.14;
593     Kt=0.0791;
594     mt=-0.25;
595 end
596 end
597 %
598 C1=(2*Kt*Ntp^(3+mt)*Ns*(4*10^6*Mt)^(2+mt)*(m3*Dt)^(n*(2+mt)))/(ROt*MUt^mt*
(MUt/MUtw)^(ac)*pi^(2+mt)*Dti^(5+mt));
599 C2=1.25*Ntp^3*Ns*(4*10^6*Mt)^2*(m3*Dt)^(2*n)/(ROt*pi^2*Dti^4);
600 Swg=pi/4*Ds^2*(angleds/360-sin(angleds*2*pi/360)/(2*pi));
601 Swt=Ntt*Ftw*pi/4*Dt^2;
602 Sw=Swg-Swt;
603 Lbc=Rbs*Ds;
604 Sm=Lbc*(Lbb+Dctl/Ltpe*(Ltp-Dt));
605 vs=Ms*10^6/(ROs*Sm);
606 Res=ROs*vs*De/MUs;
607 [a1,a2,a3,a4,b1,b2,b3,b4]=parametrostablal(Res,layout(2),tablacoeff1);
608 a=a3/(1+0.14*Res^(a4));
609 b=b3/(1+0.14*Res^(b4));
610 ch=a1*(1.33*Dt/Ltp)^(a)*(ROs*Dt/MUs)^(a2);
611 cp=b1*(1.33*Dt/Ltp)^(b)*(ROs*Dt/MUs)^(b2);
612 Ntcc=Ds/Lpp*(1-2*(Bc/100));
613 Ntcw=0.8/Lpp*(Ds*(Bc/100));
614 Nb=5;
615 Nb0=0;
616 while abs((Nb-Nb0)/Nb)>0.01
617     Nb0=Nb;
618     [Jtot,Rb,Rs,Rl] = correctionfactors(Ftw,Dctl,Lbb,angleds,Dt,Bc,Ds,Dotl,Ntt,Ntcc,
Lpp,Lbc,Res,Nb,Sm);
619     if Res>=2100 %turbulento
620         Ks1=(Sm/Sw)*((1+0.3*Ntcw)*Rl*Nb*ROs)/((Nb+1)*Ds);
621         Ks2=((Nb-1)/(Nb+1)*Rl+((Ntcc+Ntcw)/(Ntcc*(Nb+1))*Rs))*(1-2*(Bc/100))*(2*Rb*ROs*cp)
/((MUs/MUsw)^-0.14*Lpp);
622         Rp=-b2/(Ks1/(Ks2*vs^b2)+1);
623         Ks3=Ks1*vs^Rp+Ks2*vs^(Rp+b2);
624     else%laminar
625         Ntw=Ntt*Ftw;
626         Dw=4*Sw/(pi*Dt*Ntw+Ds*angleds/2);
627         k1=(26*10^3*Nb*Rl*MUs)/((Nb+1)*Ds*sqrt(Sw/Sm))*(Ntcw/(Ltp-Dt)+Lbc/Dw^2);

```

## ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```

628 k2=Nb*R1*ROs/((Nb+1)*Ds)*(Sm/Sw);
629 k3=((Nb-1)*R1/(Nb+1)+(Ntcc+Ntcw)*Rs/(Ntcc*(Nb+1)))*(1-2*(Bc/100))*(2*Rb*ROs*cp)/
((MUs/MUsw)^-0.14*Lpp);
630 Rp=2-(k1+2*k2*vs+k3*(2+b2)*vs^(1+b2))/(k1+k2*vs+k3*vs^(1+b2));
631 Ks3=(k1*vs^-1+k2+k3*vs^b2)*vs^Rp;
632 end
633 C3=((Nb+1)/((Nb-1)+(Li+Lo)))*(Ks3*Ns*4*Ms^(2-Rp))/(ROs*10^-6*(Lbb+Dctl*(Ltp-Dt)
/Ltpe))^(2-Rp);
634 Ks4=ch*(MUs/MUsw)^0.14*Prs^(-2/3)*ROs*Cps*Jtot;
635 C4=Ks4*(10^6*Ms/ROs)^(1+a2)*(Lbb+Dctl*(Ltp-Dt)/Ltpe)^-(1+a2);
636 syms Lta
637 options=optimset('Display','off');
638 Lta=1000;
639 if Ret<=2100
640     C6=1860*kt/Dt*(MUt/MUtw)^0.14*(Cpt*MUt/(kt*10^3))^(1/3)*(4*10^6*Mt)^(1/3)*
(m3*Dt)^(n/3)/(pi*MUt)^(1/3);
641     Lta=fsolve(@Ltaa -Ltaa*(Ds-m1)^n+C5*(Ds^(1+a2)*Rbs^(1+a2)/C4+Ltaa^(1/3)*(Ds-
m1)^(n/3)/C6+C7),Lta,options);
642 else if Ret>10000
643     C10=27*kt/Dt*(Cpt*MUt/(10^3*kt))^(1/3)*(MUt/MUtw)^0.14*(4*10^6*Mt)^0.8*
(m3*Dt)^(0.8*n)*Ntp^0.8/(pi*Dti*MUt)^0.8;
644     Lta=C5*(Ds^(1+a2)*Rbs^(1+a2)/C4+(Ds-m1)^(0.8*n)/C10+C7)/(Ds-m1)^n;
645 else
646     C8=0.116*kt/Dt*(MUt/MUtw)^0.14*(Cpt*MUt/(kt*10^3))^(1/3);
647     C9=(4*10^6*Mt)^(2/3)*(m3*Dt)^(2*n/3)/(pi*MUt*Dti)^(2/3);
648     Lta=fsolve(@Ltaa -Ltaa*(Ds-m1)^n+C5*(Ds^(1+a2)*Rbs^(1+a2)/C4+1/(C8*(1+
Dti/Ltaa)^(2/3))*(C9/(Ds-m1)^(2*n/3)-125)+C7),Lta,options);
649 end
650 end
651 hs=C4/(Rbs^(1+a2)*Ds^(1+a2));
652 Prs=Cps*MUs/(10^3*ks);
653 Prt=Cpt*MUt/(10^3*kt);
654 if Ret<=2100
655 ht=1860*kt/Dti*(Ret*Prt*Dti/Lta)^(1/3)*(MUt/MUtw)^(0.14);
656 else if Ret>10000
657     ht=27*kt/Dti*Ret^0.8*Prt^(1/3)*(MUt/MUtw)^(0.14);
658 else
659     ht=116*(Ret^(2/3)-125)*Prt^(1/3)*(1+Dti/Lta)^(2/3)*(MUt/MUtw)^(0.14);
660 end
661 end

663 [MUt,MUs,MUtw,MUsw] = viscosidades(MUtin,MUsin,MUtout,MUsout,Tw,Ttin,Ttout,Tsin,
Tsout,ROt,ROs);
664 Ltt=Lta+2*Lts;
665 Nb=(Lta-Lbc*(Li+Lo))/Lbc+1;
666 end
667 %coste
668 delPs=C3*Lta/(Rbs^(3-Rp)*Ds^(2-Rp));
669 delPt=C1*Ltt/(Ds-m1)^(n*(2+mt))+C2/(Ds-m1)^(2*n);
670 if (Ltt<=Lmax && Ds<=Dsmax && vt<=vtmax && vt>=vtmin && vs<=vsmax && vs>=vsmin &&
Rbs<=Rbsmax && Rbs>=Rbsmin && delPt<=delPtmax && delPs<=delPsmax)
671 A=pi*Dt*Lta*Ntt*Ns*10^-6;
672 TAC=Af*(Ca+Cb*A^c+Ce+Cf*(Ms*delPs/ROs)^g+Ce+Cf*(Mt*delPt/ROt)^g)+Cpow*H/rend

```

## ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```

(Ms*delPs/ROs*Mt*delPt/ROt);
673 if TAC<TACmin
674     TACmin=TAC;
675     puntomin=5;
676     save valorpunto.mat delPt delPs A TAC Ltt Ds Rbs vs vt
677 end
678 end
679 %vsmax vtmax
680 vt=vtmax;
681 vs=vsmax;
682 Ret=ROt*vt*Dti/MUt;
683 Ntt=fix(((4*10^6*Mt*Ntp)/(pi*vt*ROt*Dti^2)/Ntp)+1)*Ntp;
684 Ds=m1+m3*Dt*(Ntt)^(1/n);
685 Lts=0.1*Ds;
686 if Lts<25
687     Lts=25;
688 end
689 Dotl=Dt*(Ntt/K1)^(1/n);
690 Lbb=Ds-Dotl;
691 Dctl=Dotl-Dt;
692 Lbc=10^6*Ms/(vs*ROs*(Lbb+Dctl/Ltpe*(Ltp-Dt)));
693 Rbs=Lbc/Ds;
694 anglectl=2*acos((Ds/Dctl)*(1-2*Bc/100))*360/(2*pi);
695 Ftw= anglectl/360-sin(anglectl*2*pi/360)/(2*pi);
696 if Ret<=2100
697     ac=0.35;
698     Kt=16;
699     mt=-1;
700 else if Ret>10^5
701     ac=0.14;
702     Kt=0.046;
703     mt=-0.2;
704 else
705     ac=0.14;
706     Kt=0.0791;
707     mt=-0.25;
708 end
709 end
710 %
711 Ntcw=0.8/Lpp*(Ds*(Bc/100));
712 Ntcc=Ds/Lpp*(1-2*(Bc/100));
713 C1=(2*Kt*Ntp^(3+mt)*Ns*(4*10^6*Mt)^(2+mt)*(m3*Dt)^(n*(2+mt)))/(ROt*MUt^mt*
(MUt/MUtw)^(ac)*pi^(2+mt)*Dti^(5+mt));
714 C2=1.25*Ntp^3*Ns*(4*10^6*Mt)^2*(m3*Dt)^(2*n)/(ROt*pi^2*Dti^4);
715 Swg=pi/4*Ds^2*(angleds/360-sin(angleds*2*pi/360)/(2*pi));
716 Swt=Ntt*Ftw*pi/4*Dt^2;
717 Sw=Swg-Swt;
718
719 Res=ROs*vs*De/MUs;
720 [a1,a2,a3,a4,b1,b2,b3,b4]=parametrostablal(Res,layout(2),tablacoeff1);
721 a=a3/(1+0.14*Res^(a4));
722 b=b3/(1+0.14*Res^(b4));
723 ch=a1*(1.33*Dt/Ltp)^(a)*(ROs*Dt/MUs)^(a2);

```

## ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```

724 cp=b1*(1.33*Dt/Ltp)^(b)*(ROs*Dt/MUs)^(b2);
725 Sm=Lbc*(Lbb+Dctl/Ltpe*(Ltp-Dt));
726 Nb=5;
727 Nb0=0;
728 while abs((Nb-Nb0)/Nb)>0.01
729 Nb0=Nb;
730 %CORRECTION FACTORS for heat transfer and pressure drop
731 [Jtot,Rb,Rs,Rl] = correctionfactors(Ftw,Dctl,Lbb,angleds,Dt,Bc,Ds,Dctl,Ntt,Ntcc,
Lpp,Lbc,Res,Nb,Sm);
732
733 Ks4=ch*(MUs/MUsw)^0.14*Prs^(-2/3)*ROs*Cps*Jtot;
734 C4=Ks4*(10^6*Ms/ROs)^(1+a2)*(Lbb+Dctl*(Ltp-Dt)/Ltpe)^(1+a2);
735 syms Ltaa;
736 Lta=1000;
737 options=optimset('Display','off');
738 if Ret<=2100
739     C6=1860*kt/Dt*(MUt/MUtw)^0.14*(Cpt*MUt/(kt*10^3))^(1/3)*(4*10^6*Mt)^(1/3)*
(m3*Dt)^(n/3)/(pi*MUt)^(1/3);
740     Lta=fsolve(@ (Ltaa) -Ltaa*(Ds-m1)^n+C5*(Ds^(1+a2)*Rbs^(1+a2)/C4+Ltaa^(1/3)*(Ds-
m1)^(n/3)/C6+C7),Lta,options);
741 else if Ret>10000
742     C10=27*kt/Dt*(Cpt*MUt/(10^3*kt))^(1/3)*(MUt/MUtw)^0.14*(4*10^6*Mt)^0.8*
(m3*Dt)^(0.8*n)*Ntp^0.8/(pi*Dti*MUt)^0.8;
743     Lta=C5*(Ds^(1+a2)*Rbs^(1+a2)/C4+(Ds-m1)^(0.8*n)/C10+C7)/(Ds-m1)^n;
744 else
745     C8=0.116*kt/Dt*(MUt/MUtw)^0.14*(Cpt*MUt/(kt*10^3))^(1/3);
746     C9=(4*10^6*Mt)^(2/3)*(m3*Dt)^(2*n/3)/(pi*MUt*Dti)^(2/3);
747     Lta=fsolve(@ (Ltaa) -Ltaa/(Ds-m1)^n+C5*(Ds^(1+a2)*Rbs^(1+a2)/C4+1/(C8*(1+
Dti/Ltaa)^(2/3))*(C9/(Ds-m1)^(2*n/3)-125)+C7),Lta,options);
748 end
749 end
750 hs=C4/(Rbs^(1+a2)*Ds^(1+a2));
751 Prs=Cps*MUs/(10^3*ks);
752 Prt=Cpt*MUt/(10^3*kt);
753 if Ret<=2100
754 ht=1860*kt/Dti*(Ret*Prt*Dti/Lta)^(1/3)*(MUt/MUtw)^(0.14);
755 else if Ret>10000
756 ht=27*kt/Dti*Ret^0.8*Prt^(1/3)*(MUt/MUtw)^(0.14);
757 else
758 ht=116*(Ret^(2/3)-125)*Prt^(1/3)*(1+Dti/Lta)^(2/3)*(MUt/MUtw)^(0.14);
759 end
760 end
761 Tw=Ttav+(Tsav-Ttav)/(1+ht/hs);
762 [MUt,MUs,MUtw,MUsw] = viscosidades(MUtin,MUsin,MUtout,MUsout,Tw,Ttin,Ttout,Tsin,
Tsout,ROt,ROs);
763 Ltt=Lta+2*Lts;
764 Nb=(Lta-Lbc*(Li+Lo))/Lbc+1;
765 end
766 if Res>=2100 %turbulento
767 Ks1=(Sm/Sw)*((1+0.3*Ntcw)*Rl*Nb*ROs)/((Nb+1)*Ds);
768 Ks2=((Nb-1)/(Nb+1)*Rl+(Ntcc+Ntcw)/(Ntcc*(Nb+1))*Rs)*(1-2*(Bc/100))*(2*Rb*ROs*cp)
/((MUs/MUsw)^-0.14*Lpp);
769 Rp=-b2/(Ks1/(Ks2*vs^b2)+1);

```

## ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```

770 Ks3=Ks1*vs^Rp+Ks2*vs^(Rp+b2);
771 else%laminar
772 k1=(26*10^3*Nb*Rl*MUs)/((Nb+1)*Ds*sqrt(Sw/Sm))*(Ntcw/(Ltp-Dt)+Lbc/Dw^2);%que es Dw
773 k2=Nb*Rl*ROs/((Nb+1)*Ds)*(Sm/Sw);
774 k3=((Nb-1)*Rl/(Nb+1)+(Ntcc+Ntcw)*Rs/(Ntcc*(Nb+1)))*(1-2*(Bc/100))*(2*Rb*ROs*cp)/
(MUs/MUsw)^-0.14*Lpp);
775 Rp=2-(k1+2*k2*vs+k3*(2+b2)*vs^(1+b2))/(k1+k2*vs+k3*vs^(1+b2));
776 Ks3=(k1*vs^-1+k2+k3*vs^b2)*vs^Rp;%B15 no seguro si es exponente!!!
777 end
778 C3=((Nb+1)/((Nb-1)+(Li+Lo)))*(Ks3*Ns^4*Ms^(2-Rp))/(ROs*10^-6*(Lbb+Dctl*(Ltp-Dt)
/Ltpe))^(2-Rp);
779 delPs=C3*Lta/(Rbs^(3-Rp)*Ds^(2-Rp));
780 delPt=C1*Ltt/(Ds-m1)^(n*(2+mt))+C2/(Ds-m1)^(2*n);
781 if (Ltt<=Lmax && Ds<=Dsmax && vt<=vtmax && vt>=vtmin && vs<=vsmax && vs>=vsmin &&
Rbs<=Rbsmax && Rbs>=Rbsmin && delPt<=delPtmax && delPs<=delPsmax)
782 A=pi*Dt*Lta*Ntt*Ns*10^-6;
783 TAC=Af*(Ca+Cb*A^c+Ce+Cf*(Ms*delPs/ROs)^g+Ce+Cf*(Mt*delPt/ROt)^g)+Cpow*H/rend*
(Ms*delPs/ROs+Mt*delPt/ROt);
784 if TAC<TACmin
785     TACmin=TAC;
786     puntomin=6;
787     save valorpunto.mat delPt delPs A TAC Ltt Ds Rbs vs vt
788 end
789 end
790 %vtmin vsmin
791 vt=vtmin;
792 vs=vsmin;
793 Ret=ROt*vt*Dti/MUt;
794 Ntt=fix(((4*10^6*Mt*Ntp)/(pi*vt*ROt*Dti^2)/Ntp)+1)*Ntp;
795 Ds=m1+m3*Dt*(Ntt)^(1/n);
796 Lts=0.1*Ds;
797 if Lts<25
798     Lts=25;
799 end
800 Dotl=Dt*(Ntt/K1)^(1/n);
801 Lbb=Ds-Dotl;
802 Dctl=Dotl-Dt;
803 Lbc=10^6*Ms/(vs*ROs*(Lbb+Dctl/Ltpe*(Ltp-Dt)));
804 Rbs=Lbc/Ds;
805 anglectl=2*acos((Ds/Dctl)*(1-2*Bc/100))*360/(2*pi);
806 Ftw= anglectl/360-sin(anglectl*2*pi/360)/(2*pi);
807 if Ret<=2100
808     ac=0.35;
809     Kt=16;
810     mt=-1;
811 else if Ret>10^5
812     ac=0.14;
813     Kt=0.046;
814     mt=-0.2;
815 else
816     ac=0.14;
817     Kt=0.0791;
818     mt=-0.25;

```

## ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```

819     end
820 end
821 %
822 Ntcw=0.8/Lpp*(Ds*(Bc/100));
823 Ntcc=Ds/Lpp*(1-2*(Bc/100));
824 C1=(2*Kt*Ntp^(3+mt)*Ns*(4*10^6*Mt)^(2+mt)*(m3*Dt)^(n*(2+mt)))/(ROt*MUt^mt*
(MUt/MUtw)^(ac)*pi^(2+mt)*Dti^(5+mt));
825 C2=1.25*Ntp^3*Ns*(4*10^6*Mt)^2*(m3*Dt)^(2*n)/(ROt*pi^2*Dti^4);
826 Swg=pi/4*Dc^2*(angleds/360-sin(angleds*2*pi/360)/(2*pi));
827 Swt=Ntt*Ftw*pi/4*Dt^2;
828 Sw=Swg-Swt;
829 Res=ROs*vs*De/MUs;
830 [a1,a2,a3,a4,b1,b2,b3,b4]=parametrostablal(Res,layout(2),tablacoeff1);
831 a=a3/(1+0.14*Res^(a4));
832 b=b3/(1+0.14*Res^(b4));
833 ch=a1*(1.33*Dt/Ltp)^(a)*(ROs*Dt/MUs)^(a2);
834 cp=b1*(1.33*Dt/Ltp)^(b)*(ROs*Dt/MUs)^(b2);
835 Sm=Lbc*(Lbb+Dctl/Ltpe*(Ltp-Dt));
836 Nb=5;
837 Nb0=0;
838 while abs((Nb-Nb0)/Nb)>0.01
839     Nb0=Nb;
840 %CORRECTION FACTORS for heat transfer and pressure drop
841 [Jtot,Rb,Rs,Rl] = correctionfactors(Ftw,Dctl,Lbb,angleds,Dt,Bc,Ds,Dctl,Ntt,Ntcc,
Lpp,Lbc,Res,Nb,Sm);
842 Ks4=ch*(MUs/MUsw)^0.14*Prs^(-2/3)*ROs*Cps*Jtot;
843 C4=Ks4*(10^6*Ms/ROs)^(1+a2)*(Lbb+Dctl*(Ltp-Dt)/Ltpe)^-(1+a2);
844 syms Ltaa;
845 Lta=1000;
846 options=optimset('Display','off');
847
848 if Ret<=2100
849     C6=1860*kt/Dt*(MUt/MUtw)^0.14*(Cpt*MUt/(kt*10^3))^(1/3)*(4*10^6*Mt)^(1/3)*
(m3*Dt)^(n/3)/(pi*MUt)^(1/3);
850     Lta=fsolve(@ (Ltaa) -Ltaa*(Ds-m1)^n+C5*(Ds^(1+a2)*Rbs^(1+a2)/C4+Ltaa^(1/3)*(Ds-
m1)^(n/3)/C6+C7),Lta,options);
851 else if Ret>10000
852     C10=27*kt/Dt*(Cpt*MUt/(10^3*kt))^(1/3)*(MUt/MUtw)^0.14*(4*10^6*Mt)^0.8*
(m3*Dt)^(0.8*n)*Ntp^0.8/(pi*Dti*MUt)^0.8;
853     Lta=C5*(Ds^(1+a2)*Rbs^(1+a2)/C4+(Ds-m1)^(0.8*n)/C10+C7)/(Ds-m1)^n;
854 else
855     C8=0.116*kt/Dt*(MUt/MUtw)^0.14*(Cpt*MUt/(kt*10^3))^(1/3);
856     C9=(4*10^6*Mt)^(2/3)*(m3*Dt)^(2*n/3)/(pi*MUt*Dti)^(2/3);
857     Lta=fsolve(@ (Ltaa) -Ltaa/(Ds-m1)^n+C5*(Ds^(1+a2)*Rbs^(1+a2)/C4+1/(C8*(1+
Dti/Ltaa)^(2/3))*(C9/(Ds-m1)^(2*n/3)-125)+C7),Lta,options);
858     end
859 end
860 hs=C4/(Rbs^(1+a2)*Ds^(1+a2));
861 Prs=Cps*MUs/(10^3*ks);
862 Prt=Cpt*MUt/(10^3*kt);
863 if Ret<=2100
864     ht=1860*kt/Dti*(Ret*Prt*Dti/Lta)^(1/3)*(MUt/MUtw)^(0.14);
865 else if Ret>10000

```

## ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```

866      ht=27*kt/Dti*Ret^0.8*Prt^(1/3)*(MUT/MUtw)^(0.14);
867      else
868          ht=116*(Ret^(2/3)-125)*Prt^(1/3)*(1+Dti/Lta)^(2/3)*(MUT/MUtw)^(0.14);
869      end
870  end
871  Tw=Ttav+(Tsav-Ttav)/(1+ht/hs);
872  [MUT,MUS,MUtw,MUsw] = viscosidades(MUtin,MUusin,MUtout,MUsout,Tw,Ttin,Ttout,Tsin,
Tsout,ROt,ROs);
873  Ltt=Lta+2*Lts;
874  Nb=(Lta-Lbc*(Li+Lo))/Lbc+1;
875  end
876  if Res>=2100 %turbulento
877      Ks1=(Sm/Sw)*((1+0.3*Ntcw)*Rl*Nb*ROs)/((Nb+1)*Ds);
878      Ks2=((Nb-1)/(Nb+1)*Rl+((Ntcc+Ntcw)/(Ntcc*(Nb+1))*Rs))*(1-2*(Bc/100))*(2*Rb*ROs*cp)
/(MUS/MUsw)^-0.14*Lpp);
879      Rp=-b2/(Ks1/(Ks2*vs^b2)+1);
880      Ks3=Ks1*vs^Rp+Ks2*vs^(Rp+b2);
881      else%laminar
882      k1=(26*10^3*Nb*Rl*MUS)/((Nb+1)*Ds*sqrt(Sw/Sm))*((Ntcw/(Ltp-Dt)+Lbc/Dw^2);%que es Dw
883      k2=Nb*Rl*ROs/((Nb+1)*Ds)*(Sm/Sw);
884      k3=((Nb-1)*Rl/(Nb+1)+(Ntcc+Ntcw)*Rs/(Ntcc*(Nb+1)))*(1-2*(Bc/100))*(2*Rb*ROs*cp)/
((MUS/MUsw)^-0.14*Lpp);
885      Rp=2-(k1+2*k2*vs+k3*(2+b2)*vs^(1+b2))/(k1+k2*vs+k3*vs^(1+b2));
886      Ks3=(k1*vs^-1+k2+k3*vs^b2)*vs^Rp;%B15 no seguro si es exponente!!!
887  end
888  C3=((Nb+1)/((Nb-1)+(Li+Lo)))*(Ks3*Ns^4*Ms^(2-Rp))/(ROs*10^-6*(Lbb+Dct1*(Ltp-Dt)
/Ltpe))^(2-Rp);
889  delPs=C3*Lta/(Rbs^(3-Rp)*Ds^(2-Rp));
890  delPt=C1*Ltt/(Ds-m1)^(n*(2+mt))+C2/(Ds-m1)^(2*n);
891  if (Ltt<=Lmax && Ds<=Dsmax && vt<=vtmax && vt>=vtmin && vs<=vsmax && vs>=vsmin &&
Rbs<=Rbsmax && Rbs>=Rbsmin && delPt<=delPtmax && delPs<=delPsmax)
892      A=pi*Dt*Lta*Ntt*Ns*10^-6;
893      TAC=Af*(Ca+Cb*A^c+Ce+Cf*(Ms*delPs/ROs)^g+Ce+Cf*(Mt*delPt/ROt)^g)+Cpow*H/rend*
(Ms*delPs/ROs+Mt*delPt/ROt);
894  if TAC<TACmin
895      TACmin=TAC;
896      puntomin=7;
897      save valorpunto.mat delPt delPs A TAC Ltt Ds Rbs vs vt
898  end
899  end
900  %vsminDsmax
901  vs=vsmin;
902  Ds=Dsmax;
903  Res=ROs*vs*De/MUS;
904  [a1,a2,a3,a4,b1,b2,b3,b4]=parametrostablal(Res,layout(2),tablacoeff1);
905  a=a3/(1+0.14*Res^(a4));
906  b=b3/(1+0.14*Res^(b4));
907  ch=a1*(1.33*Dt/Ltp)^(a)*(ROs*Dt/MUS)^(a2);
908  cp=b1*(1.33*Dt/Ltp)^(b)*(ROs*Dt/MUS)^(b2);
909  Ntt=((Ds-m1)/(m3*Dt))^n;
910  Dotl=Dt*(Ntt/K1)^(1/n);
911  Lbb=Ds-Dotl;
912  Dctl=Dotl-Dt;

```



## ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```

913 Lbc=10^6*Ms/(vs*ROs*(Lbb+Dctl/Ltpe*(Ltp-Dt)));
914 Rbs=Lbc/Ds;
915 anglectl=2*acos((Ds/Dctl)*(1-2*Bc/100))*360/(2*pi);
916 Ftw= anglectl/360-sin(anglectl*2*pi/360)/(2*pi);
917 Swg=pi/4*Ds^2*(angleds/360-sin(angleds*2*pi/360)/(2*pi));
918 Swt=Ntt*Ftw*pi/4*Dt^2;
919 Sw=Swg-Swt;
920 Ntcc=Ds/Lpp*(1-2*(Bc/100));
921 Ntcw=0.8/Lpp*(Ds*(Bc/100));
922 vt=4*10^6*Mt*Ntp/(pi*ROt*Dti^2*Ntt);
923 Ret=ROt*vt*Dti/MUt;
924 if Ret<=2100
925     ac=0.35;
926     Kt=16;
927     mt=-1;
928 else if Ret>10^5
929     ac=0.14;
930     Kt=0.046;
931     mt=-0.2;
932 else
933     ac=0.14;
934     Kt=0.0791;
935     mt=-0.25;
936 end
937 end
938 C1=(2*Kt*Ntp^(3+mt)*Ns*(4*10^6*Mt)^(2+mt)*(m3*Dt)^(n*(2+mt)))/(ROt*MUt^mt*
(MUt/MUtw)^(ac)*pi^(2+mt)*Dti^(5+mt));
939 C2=1.25*Ntp^3*Ns*(4*10^6*Mt)^2*(m3*Dt)^(2*n)/(ROt*pi^2*Dti^4);
940 Sm=Lbc*(Lbb+Dctl/Ltpe*(Ltp-Dt));
941 Nb=5;
942 Nb0=0;
943 while abs((Nb-Nb0)/Nb)>0.01
944 Nb0=Nb;
945 [Jtot,Rb,Rs,Rl] = correctionfactors(Ftw,Dctl,Lbb,angleds,Dt,Bc,Ds,Dctl,Ntt,Ntcc,
Lpp,Lbc,Res,Nb,Sm);
946 Ks4=ch*(MUs/MUsw)^0.14*Prs^(-2/3)*ROs*Cps*Jtot;
947 C4=Ks4*(10^6*Ms/ROs)^(1+a2)*(Lbb+Dctl*(Ltp-Dt)/Ltpe)^-(1+a2);
948 syms Ltaa;
949 Lta=1000;
950 options=optimset('Display','off');
951 if Ret<=2100
952     C6=1860*kt/Dt*(MUt/MUtw)^0.14*(Cpt*MUt/(kt*10^3))^(1/3)*(4*10^6*Mt)^(1/3)*
(m3*Dt)^(n/3)/(pi*MUt)^(1/3);
953     Lta=fsolve(@ (Ltaa) -Ltaa*(Ds-m1)^n+C5*(Ds^(1+a2)*Rbs^(1+a2)/C4+Ltaa^(1/3)*(Ds-
m1)^(n/3)/C6+C7),Lta,options);
954 else if Ret>10000
955     C10=27*kt/Dt*(Cpt*MUt/(10^3*kt))^(1/3)*(MUt/MUtw)^0.14*(4*10^6*Mt)^0.8*
(m3*Dt)^(0.8*n)*Ntp^0.8/(pi*Dti*MUt)^0.8;
956     Lta=C5*(Ds^(1+a2)*Rbs^(1+a2)/C4+(Ds-m1)^(0.8*n)/C10+C7)/(Ds-m1)^n;
957 else
958     C8=0.116*kt/Dt*(MUt/MUtw)^0.14*(Cpt*MUt/(kt*10^3))^(1/3);
959     C9=(4*10^6*Mt)^(2/3)*(m3*Dt)^(2*n/3)/(pi*MUt*Dti)^(2/3);
960     Lta=fsolve(@ (Ltaa) -Ltaa/(Ds-m1)^n+C5*(Ds^(1+a2)*Rbs^(1+a2)/C4+1/(C8*(1+

```

## ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```

(Dti/Ltaa)^(2/3))* (C9/(Ds-m1)^(2*n/3)-125)+C7)),Lta,options);
961     end
962 end
963 hs=C4/(Rbs^(1+a2)*Ds^(1+a2));
964 Prs=Cps*MUS/(10^3*ks);
965 Prt=Cpt*MUt/(10^3*kt);
966 if Ret<=2100
967 ht=1860*kt/Dti*(Ret*Prt*Dti/Lta)^(1/3)*(MUt/MUtw)^(0.14);
968 else if Ret>10000
969     ht=27*kt/Dti*Ret^0.8*Prt^(1/3)*(MUt/MUtw)^(0.14);
970 else
971     ht=116*(Ret^(2/3)-125)*Prt^(1/3)*(1+Dti/Lta)^(2/3)*(MUt/MUtw)^(0.14);
972 end
973 end
974 Tw=Ttav+(Tsav-Ttav)/(1+ht/hs);
975 [MUt,MUS,MUtw,MUsw] = viscosidades(MUtin,MUsin,MUtout,MUsout,Tw,Ttin,Ttout,Tsin,
Tsout,ROt,ROs);
976 Lts=0.1*Ds;
977 if Lts<25
978     Lts=25;
979 end
980 Ltt=Lta+2*Lts;
981 Nb=(Lta-Lbc*(Li+Lo))/Lbc+1;
982 end
983 %Shell-side pressure drop, Cálculo Rp y C3
984 if Res>=2100 %turbulento
985 Ks1=(Sm/Sw)*((1+0.3*Ntcw)*Rl*Nb*ROs)/((Nb+1)*Ds);
986 Ks2=((Nb-1)/(Nb+1)*Rl+((Ntcc+Ntcw)/(Ntcc*(Nb+1))*Rs))*(1-2*(Bc/100))*(2*Rb*ROs*cp)
/((MUS/MUsw)^-0.14*Lpp);
987 Rp=-b2/(Ks1/(Ks2*vs^b2)+1);
988 Ks3=Ks1*vs^Rp+Ks2*vs^(Rp+b2);
989 else%laminar
990 Ntw=Ntt*Ftw;
991 Dw=4*Sw/(pi*Dt*Ntw+Ds*angleds/2);
992 k1=(26*10^3*Nb*Rl*MUS)/((Nb+1)*Ds*sqrt(Sw/Sm))*(Ntcw/(Ltp-Dt)+Lbc/Dw^2);
993 k2=Nb*Rl*ROs/((Nb+1)*Ds)*(Sm/Sw);
994 k3=((Nb-1)*Rl/(Nb+1)+(Ntcc+Ntcw)*Rs/(Ntcc*(Nb+1)))*(1-2*(Bc/100))*(2*Rb*ROs*cp)
/((MUS/MUsw)^-0.14*Lpp);
995 Rp=2-(k1+2*k2*vs+k3*(2+b2)*vs^(1+b2))/(k1+k2*vs+k3*vs^(1+b2));
996 Ks3=(k1*vs^-1+k2+k3*vs^b2)*vs^Rp;
997 end
998 C3=((Nb+1)/((Nb-1)+(Li+Lo)))*(Ks3*Ns^4*Ms^(2-Rp))/(ROs*10^-6*(Lbb+Dct1*(Ltp-Dt)
/Ltpe))^(2-Rp);
999 delPs=C3*Lta/(Rbs^(3-Rp)*Ds^(2-Rp));
1000 delPt=C1*Ltt/(Ds-m1)^(n*(2+mt))+C2/(Ds-m1)^(2*n);
1001 if (Ltt<=Lmax && Ds<=Dsmax && vt<=vtmax && vt>=vtmin && vs<=vsmax && vs>=vsmin &&
Rbs<=Rbsmax && Rbs>=Rbsmin && delPt<=delPtmax && delPs<=delPsmax)
1002 A=pi*Dt*Lta*Ntt*Ns*10^-6;
1003 TAC=Af*(Ca+Cb*A^c+Ce+Cf*(Ms*delPs/ROs)^g+Ce+Cf*(Mt*delPt/ROt)^g)+Cpow*H/rend*
(Ms*delPs/ROs+Mt*delPt/ROt);
1004 if TAC<TACmin
1005     TACmin=TAC;
1006     puntomin=8;

```

## ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```

1007     save valorpunto.mat delPt delPs A TAC Ltt Ds Rbs vs vt
1008 end
1009 end
1010 %VtmindelPsmax
1011 vt=vtmin;
1012 vs=vsmax;
1013 Ret=ROt*vt*Dti/MUt;
1014 Ntt=fix(((4*10^6*Mt*Ntp)/(pi*vt*ROt*Dti^2)/Ntp)+1)*Ntp;
1015 Ds=m1+m3*Dt*(Ntt)^(1/n);
1016 Lts=0.1*Ds;
1017 if Lts<25
1018     Lts=25;
1019 end
1020 Dotl=Dt*(Ntt/K1)^(1/n);
1021 Lbb=Ds-Dotl;
1022 Dctl=Dotl-Dt;
1023 Lbc=10^6*Ms/(vs*ROs*(Lbb+Dctl/Ltpe*(Ltp-Dt)));
1024 Rbs=Lbc/Ds;
1025 anglectl=2*acos((Ds/Dctl)*(1-2*Bc/100))*360/(2*pi);
1026 Ftw= anglectl/360-sin(anglectl*2*pi/360)/(2*pi);
1027 if Ret<=2100
1028     ac=0.35;
1029     Kt=16;
1030     mt=-1;
1031 else if Ret>10^5
1032     ac=0.14;
1033     Kt=0.046;
1034     mt=-0.2;
1035 else
1036     ac=0.14;
1037     Kt=0.0791;
1038     mt=-0.25;
1039 end
1040 end
1041 %
1042 Ntcw=0.8/Lpp*(Ds*(Bc/100));
1043 Ntcc=Ds/Lpp*(1-2*(Bc/100));
1044 C1=(2*Kt*Ntp^(3+mt)*Ns*(4*10^6*Mt)^(2+mt)*(m3*Dt)^(n*(2+mt)))/(ROt*MUt^mt*
(MUt/MUtw)^(ac)*pi^(2+mt)*Dti^(5+mt));
1045 C2=1.25*Ntp^3*Ns*(4*10^6*Mt)^2*(m3*Dt)^(2*n)/(ROt*pi^2*Dti^4);
1046 Swg=pi/4*Ds^2*(angleds/360-sin(angleds*2*pi/360)/(2*pi));
1047 Swt=Ntt*Ftw*pi/4*Dt^2;
1048 Sw=Swg-Swt;
1049
1050 Res=ROs*vs*De/MUs;
1051 [a1,a2,a3,a4,b1,b2,b3,b4]=parametrostablal(Res,layout(2),tablacoeff1);
1052 a=a3/(1+0.14*Res^(a4));
1053 b=b3/(1+0.14*Res^(b4));
1054 ch=a1*(1.33*Dt/Ltp)^(a)*(ROs*Dt/MUs)^(a2);
1055 cp=b1*(1.33*Dt/Ltp)^(b)*(ROs*Dt/MUs)^(b2);
1056 Sm=Lbc*(Lbb+Dctl/Ltpe*(Ltp-Dt));
1057
1058 Nb=5;

```

## ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```

1059 Nb0=0;
1060 while abs((Nb-Nb0)/Nb)>0.01
1061 Nb0=Nb;
1062 %CORRECTION FACTORS for heat transfer and pressure drop
1063 [Jtot,Rb,Rs,Rl] = correctionfactors(Ftw,Dctl,Lbb,angleds,Dt,Bc,Ds,Dotl,Ntt,Ntcc,
Lpp,Lbc,Res,Nb,Sm);
1064 Ks4=ch*(MUs/MUsw)^0.14*Prs^(-2/3)*ROs*Cps*Jtot;
1065 C4=Ks4*(10^6*Ms/ROs)^(1+a2)*(Lbb+Dctl*(Ltp-Dt)/Ltpe)^-(1+a2);
1066 syms Ltaa;
1067 Lta=1000;
1068 options=optimset('Display','off');
1069 if Ret<=2100
1070     C6=1860*kt/Dt*(MUt/MUtw)^0.14*(Cpt*MUt/(kt*10^3))^(1/3)*(4*10^6*Mt)^(1/3)*
(m3*Dt)^(n/3)/(pi*MUt)^(1/3);
1071     Lta=fsolve(@ (Ltaa) -Ltaa*(Ds-m1)^n+C5*(Ds^(1+a2)*Rbs^(1+a2)/C4+Ltaa^(1/3)*(Ds-
m1)^(n/3)/C6+C7),Lta,options);
1072 else if Ret>10000
1073     C10=27*kt/Dt*(Cpt*MUt/(10^3*kt))^(1/3)*(MUt/MUtw)^0.14*(4*10^6*Mt)^0.8*
(m3*Dt)^(0.8*n)*Ntp^0.8/(pi*Dti*MUt)^0.8;
1074     Lta=C5*(Ds^(1+a2)*Rbs^(1+a2)/C4+(Ds-m1)^(0.8*n)/C10+C7)/(Ds-m1)^n;
1075 else
1076     C8=0.116*kt/Dt*(MUt/MUtw)^0.14*(Cpt*MUt/(kt*10^3))^(1/3);
1077     C9=(4*10^6*Mt)^(2/3)*(m3*Dt)^(2*n/3)/(pi*MUt*Dti)^(2/3);
1078     Lta=fsolve(@ (Ltaa) -Ltaa/(Ds-m1)^n+C5*(Ds^(1+a2)*Rbs^(1+a2)/C4+1/(C8*(1+
Dti/Ltaa)^(2/3))*(C9/(Ds-m1)^(2*n/3)-125)+C7),Lta,options);
1079 end
1080 end
1081 hs=C4/(Rbs^(1+a2)*Ds^(1+a2));
1082 Prs=Cps*MUs/(10^3*ks);
1083 Prt=Cpt*MUt/(10^3*kt);
1084 if Ret<=2100
1085 ht=1860*kt/Dti*(Ret*Prt*Dti/Lta)^(1/3)*(MUt/MUtw)^(0.14);
1086 else if Ret>10000
1087     ht=27*kt/Dti*Ret^0.8*Prt^(1/3)*(MUt/MUtw)^(0.14);
1088 else
1089     ht=116*(Ret^(2/3)-125)*Prt^(1/3)*(1+Dti/Lta)^(2/3)*(MUt/MUtw)^(0.14);
1090 end
1091 end
1092 Tw=Ttav+(Tsav-Ttav)/(1+ht/hs);
1093 [MUt,MUs,MUtw,MUsw] = viscosidades(MUtin,MUusin,MUtout,MUsout,Tw,Ttin,Ttout,Tsin,
Tsout,ROT,ROs);
1094 Ltt=Lta+2*Lts;
1095 Nb=(Lta-Lbc*(Li+Lo))/Lbc+1;
1096 end
1097 if Res>=2100 %turbulento
1098 Ks1=(Sm/Sw)*((1+0.3*Ntcw)*Rl*Nb*ROs)/((Nb+1)*Ds);
1099 Ks2=((Nb-1)/(Nb+1)*Rl+((Ntcc+Ntcw)/(Ntcc*(Nb+1))*Rs))*(1-2*(Bc/100))*(2*Rb*ROs*cp)
/(MUs/MUsw)^-0.14*Lpp;
1100 Rp=-b2/(Ks1/(Ks2*vs^b2)+1);
1101 Ks3=Ks1*vs^Rp+Ks2*vs^(Rp+b2);
1102 else%laminar
1103 k1=(26*10^3*Nb*Rl*MUs)/((Nb+1)*Ds*sqrt(Sw/Sm))*(Ntcw/(Ltp-Dt)+Lbc/Dw^2);%que es Dw
1104 k2=Nb*Rl*ROs/((Nb+1)*Ds)*(Sm/Sw);

```

## ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```

1105 k3=((Nb-1)*Rl/(Nb+1)+(Ntcc+Ntcw)*Rs/(Ntcc*(Nb+1)))*(1-2*(Bc/100))*(2*Rb*ROs*cp)/
( (MUs/MUsw)^-0.14*Lpp);
1106 Rp=2-(k1+2*k2*vs+k3*(2+b2)*vs^(1+b2))/(k1+k2*vs+k3*vs^(1+b2));
1107 Ks3=(k1*vs^-1+k2+k3*vs^b2)*vs^Rp;%B15 no seguro si es exponente!!!
1108 end
1109 C3=((Nb+1)/((Nb-1)+(Li+Lo)))*(Ks3*Ns*4*Ms^(2-Rp))/(ROs*10^-6*(Lbb+Dctl*(Ltp-Dt)
/Ltpe))^(2-Rp);
1110 delPs=C3*Lta/(Rbs^(3-Rp)*Ds^(2-Rp));
1111 if delPs>delPsmax
1112 while delPs>delPsmax
1113     vs=vs-0.003;
1114     Lbc=10^6*Ms/(vs*ROs*(Lbb+Dctl/Ltpe*(Ltp-Dt)));
1115     Rbs=Lbc/Ds;
1116     anglectl=2*acos((Ds/Dctl)*(1-2*Bc/100))*360/(2*pi);
1117     Ftw= anglectl/360-sin(anglectl*2*pi/360)/(2*pi);
1118     if Ret<=2100
1119         ac=0.35;
1120         Kt=16;
1121         mt=-1;
1122     else if Ret>10^5
1123         ac=0.14;
1124         Kt=0.046;
1125         mt=-0.2;
1126     else
1127         ac=0.14;
1128         Kt=0.0791;
1129         mt=-0.25;
1130     end
1131 end
1132 %
1133 Ntcw=0.8/Lpp*(Ds*(Bc/100));
1134 Ntcc=Ds/Lpp*(1-2*(Bc/100));
1135 C1=(2*Kt*Ntp^(3+mt)*Ns*(4*10^6*Mt)^(2+mt)*(m3*Dt)^(n*(2+mt)))/(ROt*MUt^mt*
(MUt/MUtw)^(ac)*pi^(2+mt)*Dti^(5+mt));
1136 C2=1.25*Ntp^3*Ns*(4*10^6*Mt)^2*(m3*Dt)^(2*n)/(ROt*pi^2*Dti^4);
1137 Swg=pi/4*Ds^2*(angleds/360-sin(angleds*2*pi/360)/(2*pi));
1138 Swt=Ntt*Ftw*pi/4*Dt^2;
1139 Sw=Swg-Swt;
1140
1141 Res=ROs*vs*De/MUs;
1142 [a1,a2,a3,a4,b1,b2,b3,b4]=parametrostablal(Res,layout(2),tablacoeff1);
1143 a=a3/(1+0.14*Res^(a4));
1144 b=b3/(1+0.14*Res^(b4));
1145 ch=a1*(1.33*Dt/Ltp)^(a)*(ROs*Dt/MUs)^(a2);
1146 cp=b1*(1.33*Dt/Ltp)^(b)*(ROs*Dt/MUs)^(b2);
1147 Sm=Lbc*(Lbb+Dctl/Ltpe*(Ltp-Dt));
1148 Nb=5;Nb0=0;
1149 while abs((Nb-Nb0)/Nb)>0.01
1150     Nb0=Nb;
1151 %CORRECTION FACTORS for heat transfer and pressure drop
1152 [Jtot,Rb,Rs,Rl]= correctionfactors(Ftw,Dctl,Lbb,angleds,Dt,Bc,Ds,Dotl,Ntt,Ntcc,
Lpp,Lbc,Res,Nb,Sm);
1153 Ks4=ch*(MUs/MUsw)^0.14*Prs^(-2/3)*ROs*Cps*Jtot;

```

## ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```

1154 C4=Ks4*(10^6*Ms/ROs)^(1+a2)*(Lbb+Dctl*(Ltp-Dt)/Ltpe)^-(1+a2);
1155 syms Ltaa;
1156 Lta=1000;
1157 options=optimset('Display','off');
1158 if Ret<=2100
1159     C6=1860*kt/Dt*(MUt/MUtw)^0.14*(Cpt*MUt/(kt*10^3))^(1/3)*(4*10^6*Mt)^(1/3)*
(m3*Dt)^(n/3)/(pi*MUt)^(1/3);
1160     Lta=fsolve(@ (Ltaa) -Ltaa*(Ds-m1)^n+C5*(Ds^(1+a2)*Rbs^(1+a2)/C4+Ltaa^(1/3)*(Ds-
m1)^(n/3)/C6+C7),Lta,options);
1161 else if Ret>10000
1162     C10=27*kt/Dt*(Cpt*MUt/(10^3*kt))^(1/3)*(MUt/MUtw)^0.14*(4*10^6*Mt)^0.8*
(m3*Dt)^(0.8*n)*Ntp^0.8/(pi*Dti*MUt)^0.8;
1163     Lta=C5*(Ds^(1+a2)*Rbs^(1+a2)/C4+(Ds-m1)^(0.8*n)/C10+C7)/(Ds-m1)^n;
1164 else
1165     C8=0.116*kt/Dt*(MUt/MUtw)^0.14*(Cpt*MUt/(kt*10^3))^(1/3);
1166     C9=(4*10^6*Mt)^(2/3)*(m3*Dt)^(2*n/3)/(pi*MUt*Dti)^(2/3);
1167     Lta=fsolve(@ (Ltaa) -Ltaa/(Ds-m1)^n+C5*(Ds^(1+a2)*Rbs^(1+a2)/C4+1/(C8*(1+
Dti/Ltaa)^(2/3))*(C9/(Ds-m1)^(2*n/3)-125)+C7),Lta,options);
1168 end
1169 end
1170 hs=C4/(Rbs^(1+a2)*Ds^(1+a2));
1171 Prs=Cps*MUs/(10^3*ks);
1172 Prt=Cpt*MUt/(10^3*kt);
1173 if Ret<=2100
1174 ht=1860*kt/Dti*(Ret*Prt*Dti/Lta)^(1/3)*(MUt/MUtw)^(0.14);
1175 else if Ret>10000
1176 ht=27*kt/Dti*Ret^0.8*Prt^(1/3)*(MUt/MUtw)^(0.14);
1177 else
1178 ht=116*(Ret^(2/3)-125)*Prt^(1/3)*(1+Dti/Lta)^(2/3)*(MUt/MUtw)^(0.14);
1179 end
1180 end
1181 Tw=Ttav+(Tsav-Ttav)/(1+ht/hs);
1182 [MUt,MUs,MUtw,MUsw] = viscosidades(MUtin,MUusin,MUtout,MUsout,Tw,Ttin,Ttout,Tsin,
Tsout,ROt,ROs);
1183 Ltt=Lta+2*Lts;
1184 Nb=(Lta-Lbc*(Li+Lo))/Lbc+1;
1185 end
1186 if Res>=2100 %turbulento
1187 Ks1=(Sm/Sw)*((1+0.3*Ntcw)*Rl*Nb*ROs)/((Nb+1)*Ds);
1188 Ks2=((Nb-1)/(Nb+1)*Rl+(Ntcc+Ntcw)/(Ntcc*(Nb+1))*Rs)*(1-2*(Bc/100))*(2*Rb*ROs*cp)
/((MUs/MUsw)^-0.14*Lpp);
1189 Rp=-b2/(Ks1/(Ks2*vs^b2)+1);
1190 Ks3=Ks1*vs^Rp+Ks2*vs^(Rp+b2);
1191 else%laminar
1192 k1=(26*10^3*Nb*Rl*MUs)/((Nb+1)*Ds*sqrt(Sw/Sm))*(Ntcw/(Ltp-Dt)+Lbc/Dw^2);%que es Dw
1193 k2=Nb*Rl*ROs/((Nb+1)*Ds)*(Sm/Sw);
1194 k3=((Nb-1)*Rl/(Nb+1)+(Ntcc+Ntcw)*Rs/(Ntcc*(Nb+1)))*(1-2*(Bc/100))*(2*Rb*ROs*cp)/
((MUs/MUsw)^-0.14*Lpp);
1195 Rp=2-(k1+2*k2*vs+k3*(2+b2)*vs^(1+b2))/(k1+k2*vs+k3*vs^(1+b2));
1196 Ks3=(k1*vs^-1+k2+k3*vs^b2)*vs^Rp;%B15 no seguro si es exponente!!!
1197 end
1198 C3=((Nb+1)/((Nb-1)+(Li+Lo)))*(Ks3*Ns*4*Ms^(2-Rp))/(ROs*10^-6*(Lbb+Dctl*(Ltp-Dt)
/Ltpe))^(2-Rp);

```

## ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```

1199 delPs=C3*Lta/(Rbs^(3-Rp)*Ds^(2-Rp));
1200 end
1201 delPt=C1*Ltt/(Ds-m1)^(n*(2+mt))+C2/(Ds-m1)^(2*n);
1202 if (Ltt<=Lmax && Ds<=Dsmax && vt<=vtmax && vt>=vtmin && vs<=vsmax && vs>=vsmin &&
Rbs<=Rbsmax && Rbs>=Rbsmin && delPt<=delPtmax && delPs<=delPsmax)
1203 A=pi*Dt*Lta*Ntt*Ns*10^-6;
1204 TAC=Af*(Ca+Cb*A^c+Ce+Cf*(Ms*delPs/ROs)^g+Ce+Cf*(Mt*delPt/ROt)^g)+Cpow*H/rend*
(Ms*delPs/ROs+Mt*delPt/ROt);
1205 if TAC<TACmin
1206     TACmin=TAC;
1207     puntomin=9;
1208     save valorpunto.mat delPt delPs A TAC Ltt Ds Rbs vs vt
1209 end
1210 end
1211 else
1212 while delPs<delPsmax
1213     vs=vs+0.003;
1214 Lbc=10^6*Ms/(vs*ROs*(Lbb+Dctl/Ltpe*(Ltp-Dt)));
1215 Rbs=Lbc/Ds;
1216 anglectl=2*acos((Ds/Dctl)*(1-2*Bc/100))*360/(2*pi);
1217 Ftw= anglectl/360-sin(anglectl*2*pi/360)/(2*pi);
1218 if Ret<=2100
1219     ac=0.35;
1220     Kt=16;
1221     mt=-1;
1222 else if Ret>10^5
1223     ac=0.14;
1224     Kt=0.046;
1225     mt=-0.2;
1226 else
1227     ac=0.14;
1228     Kt=0.0791;
1229     mt=-0.25;
1230 end
1231 end
1232 %
1233 Ntcw=0.8/Lpp*(Ds*(Bc/100));
1234 Ntcc=Ds/Lpp*(1-2*(Bc/100));
1235 C1=(2*Kt*Ntp^(3+mt)*Ns*(4*10^6*Mt)^(2+mt)*(m3*Dt)^(n*(2+mt)))/(ROt*MUt^mt*
(MUt/MUtw)^(ac)*pi^(2+mt)*Dti^(5+mt));
1236 C2=1.25*Ntp^3*Ns*(4*10^6*Mt)^2*(m3*Dt)^(2*n)/(ROt*pi^2*Dti^4);
1237 Swg=pi/4*Dc^2*(angleds/360-sin(angleds*2*pi/360)/(2*pi));
1238 Swt=Ntt*Ftw*pi/4*Dt^2;
1239 Sw=Swg-Swt;
1240
1241 Res=ROs*vs*De/MUs;
1242 [a1,a2,a3,a4,b1,b2,b3,b4]=parametrostablal(Res,layout(2),tablacoeff1);
1243 a=a3/(1+0.14*Res^(a4));
1244 b=b3/(1+0.14*Res^(b4));
1245 ch=a1*(1.33*Dt/Ltp)^(a)*(ROs*Dt/MUs)^(a2);
1246 cp=b1*(1.33*Dt/Ltp)^(b)*(ROs*Dt/MUs)^(b2);
1247 Sm=Lbc*(Lbb+Dctl/Ltpe*(Ltp-Dt));
1248 Nb=5;Nb0=0;

```

## ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```

1249 while abs((Nb-Nb0)/Nb)>0.01
1250 Nb0=Nb;
1251 %CORRECTION FACTORS for heat transfer and pressure drop
1252 [Jtot,Rb,Rs,Rl] = correctionfactors(Ftw,Dctl,Lbb,angleds,Dt,Bc,Ds,Dotl,Ntt,Ntcc,
Lpp,Lbc,Res,Nb,Sm);
1253 Ks4=ch*(MUs/MUsw)^0.14*Prs^(-2/3)*ROs*Cps*Jtot;
1254 C4=Ks4*(10^6*Ms/ROs)^(1+a2)*(Lbb+Dctl*(Ltp-Dt)/Ltpe)^-(1+a2);
1255 syms Ltaa;
1256 Lta=1000;
1257 options=optimset('Display','off');
1258 if Ret<=2100
1259     C6=1860*kt/Dt*(MUt/MUtw)^0.14*(Cpt*MU/(kt*10^3))^(1/3)*(4*10^6*Mt)^(1/3)*
(m3*Dt)^(n/3)/(pi*MU)^(1/3);
1260     Lta=fsolve(@ (Ltaa) -Ltaa*(Ds-m1)^n+C5*(Ds^(1+a2)*Rbs^(1+a2)/C4+Ltaa^(1/3)*(Ds-
m1)^(n/3)/C6+C7),Lta,options);
1261 else if Ret>10000
1262     C10=27*kt/Dt*(Cpt*MU/(10^3*kt))^(1/3)*(MUt/MUtw)^0.14*(4*10^6*Mt)^0.8*
(m3*Dt)^(0.8*n)*Ntp^0.8/(pi*Dti*MU)^(0.8);
1263     Lta=C5*(Ds^(1+a2)*Rbs^(1+a2)/C4+(Ds-m1)^(0.8*n)/C10+C7)/(Ds-m1)^n;
1264 else
1265     C8=0.116*kt/Dt*(MUt/MUtw)^0.14*(Cpt*MU/(kt*10^3))^(1/3);
1266     C9=(4*10^6*Mt)^(2/3)*(m3*Dt)^(2*n/3)/(pi*MU*Dti)^(2/3);
1267     Lta=fsolve(@ (Ltaa) -Ltaa/(Ds-m1)^n+C5*(Ds^(1+a2)*Rbs^(1+a2)/C4+1/(C8*(1+
Dti/Ltaa)^(2/3))*(C9/(Ds-m1)^(2*n/3)-125)+C7),Lta,options);
1268 end
1269 end
1270 hs=C4/(Rbs^(1+a2)*Ds^(1+a2));
1271 Prs=Cps*MUs/(10^3*ks);
1272 Prt=Cpt*MU/(10^3*kt);
1273 if Ret<=2100
1274 ht=1860*kt/Dti*(Ret*Prt*Dti/Lta)^(1/3)*(MUt/MUtw)^(0.14);
1275 else if Ret>10000
1276 ht=27*kt/Dti*Ret^0.8*Prt^(1/3)*(MUt/MUtw)^(0.14);
1277 else
1278 ht=116*(Ret^(2/3)-125)*Prt^(1/3)*(1+Dti/Lta)^(2/3)*(MUt/MUtw)^(0.14);
1279 end
1280 end
1281 Tw=Ttav+(Tsav-Ttav)/(1+ht/hs);
1282 [MUt,MUs,MUtw,MUsw] = viscosidades(MUtin,MUtin,MUtout,MUout,Tw,Ttin,Ttout,Tsin,
Tsout,ROt,ROs);
1283 Ltt=Lta+2*Lts;
1284 Nb=(Lta-Lbc*(Li+Lo))/Lbc+1;
1285 end
1286 if Res>=2100 %turbulento
1287 Ks1=(Sm/Sw)*((1+0.3*Ntcw)*Rl*Nb*ROs)/((Nb+1)*Ds);
1288 Ks2=((Nb-1)/(Nb+1)*Rl+((Ntcc+Ntcw)/(Ntcc*(Nb+1))*Rs))*(1-2*(Bc/100))*(2*Rb*ROs*cp)
/((MUs/MUsw)^-0.14*Lpp);
1289 Rp=-b2/(Ks1/(Ks2*vs^b2)+1);
1290 Ks3=Ks1*vs^Rp+Ks2*vs^(Rp+b2);
1291 else%laminar
1292 k1=(26*10^3*Nb*Rl*MUs)/((Nb+1)*Ds*sqrt(Sw/Sm))*(Ntcw/(Ltp-Dt)+Lbc/Dw^2);%que es Dw
1293 k2=Nb*Rl*ROs/((Nb+1)*Ds)*(Sm/Sw);
1294 k3=((Nb-1)*Rl/(Nb+1)+(Ntcc+Ntcw)*Rs/(Ntcc*(Nb+1)))*(1-2*(Bc/100))*(2*Rb*ROs*cp)/

```



## ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```

((MUs/MUsw)^-0.14*Lpp);
1295 Rp=2-(k1+2*k2*vs+k3*(2+b2)*vs^(1+b2))/(k1+k2*vs+k3*vs^(1+b2));
1296 Ks3=(k1*vs^-1+k2+k3*vs^b2)*vs^Rp;
1297 end
1298 C3=((Nb+1)/((Nb-1)+(Li+Lo)))*(Ks3*Ns^4*Ms^(2-Rp))/(ROs*10^-6*(Lbb+Dctl*(Ltp-Dt)
/Ltpe))^(2-Rp);
1299 delPs=C3*Lta/(Rbs^(3-Rp)*Ds^(2-Rp));
1300 end
1301 delPt=C1*Ltt/(Ds-m1)^(n*(2+mt))+C2/(Ds-m1)^(2*n);
1302 if (Ltt<=Lmax && Ds<=Dsmax && vt<=vtmax && vt>=vtmin && vs<=vsmax && vs>=vsmin &&
Rbs<=Rbsmax && Rbs>=Rbsmin && delPt<=delPtmax && delPs<=delPsmax)
1303 A=pi*Dt*Lta*Ntt*Ns*10^-6;
1304 TAC=Af*(Ca+Cb*A^c+Ce+Cf*(Ms*delPs/ROs)^g+Ce+Cf*(Mt*delPt/ROt)^g)+Cpow*H/rend*
(Ms*delPs/ROs+Mt*delPt/ROt);
1305 if TAC<TACmin
1306     TACmin=TAC;
1307     puntomin=9;
1308     save valorpunto.mat delPt delPs A TAC Ltt Ds Rbs vs vt
1309 end
1310 end
1311 end
1312 punto=puntomin;
1313 save punto.mat punto

```

## ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```

1 function [Jtot,Rb,Rs,Rl] = correctionfactors(Ftw,~,Lbb,angleds,Dt,Bc,Ds,Dotl,Ntt,↵
Ntcc,Lpp,Lbc,Res,Nb,Sm)
2 %CORRECTION FACTORS for heat transfer and pressure drop
3 %inputs (Ftw,Lbb,angleds,Dt,Bc,Ds,Dotl,Ntt,Ntcc,Lpp,Lbc,Res,Nb,Sm)
4 %SALIDAS
5 %factores de corrección Jtot=Jc*Jl*Jb*Js*Jr y Rl,Rb,Rs
6 %Baffle Window Flow
7 Fc=1-2*Ftw;
8 Jc=0.55+0.72*Fc;
9 %Baffle Leakage (Kuppan Thulukkanam)
10 Lsb=0.8+0.002*Ds+0.75;
11 Ssb=Ds*Lsb*(pi-0.5*angleds*pi/180);
12 if Dt<=31.75
13     if 2*Lbc<914.4
14         Ltb=0.4;
15     else
16         Ltb=0.2;
17     end
18 else
19     Ltb=0.4;
20 end
21
22 Stb=0.5*pi*Dt*Ltb*Ntt*(1+Fc);
23 rs=Ssb/(Ssb+Stb);
24 rl=(Ssb+Stb)/Sm;
25 Jl=0.44*(1-rs)+(1-0.44*(1-rs))*exp(-2.2*rl);
26 p=0.8-0.15*(1+rs);
27 Rl=exp(-1.33*(1+rs)*rl^p);
28 %Bundle Bypass Flow
29 if Lbb>30
30     Nss=Ntcc/6;%Ntcc/6<=Nss<=Ntcc/4
31 else
32     Nss=0;
33 end
34 rss=Nss/(2*Ntcc);
35 if Res<100
36     Cj=1.35;
37     Cr=4.5;
38 else
39     Cj=1.25;
40     Cr=3.7;
41 end
42 if rss<0.5
43 Sb=Lbc*(Ds-Dotl);
44 Jb=exp(-Cj*(Sb/Sm)*(1-(2*rss)^(1/3)));
45 Rb=exp(-Cr*(Sb/Sm)*(1-(2*rss)^(1/3)));
46 else
47     Jb=1;
48     Rb=1;
49 end
50 %Unequal Baffle Spacing
51 if Res >= 100
52     n1=0.6;

```

## ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```

53     n2=0.2;
54 else
55     n1=1/3;
56     n2=1;
57 end
58 Lbi=Lbc;
59 Lbo=Lbc;
60 Js=((Nb-1)+(Lbi/Lbc)^(1-n1)+(Lbo/Lbc)^(1-n1))/((Nb-1)+(Lbi/Lbc)+(Lbo/Lbc));
61 Rs=0.5*((Lbc/Lbi)^(2-n2)+(Lbc/Lbo)^(2-n2));
62 %Laminar Flow
63 Ntcw=0.8/Lpp*(Ds*(Bc/100));
64 Nct=(Nb+1)*(Ntcc+Ntcw);
65 if Res<=20
66     Jr=(10/Nct)^0.18;
67 else if Res>=100
68     Jr=1;
69     else %interpol
70     Jr=(Res*(1-(10/Nct)^0.18))/(100-20);
71     end
72 end
73 Jtot=Jc*Jl*Jb*Js*Jr;
74 end

```

## ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

```

1 function [MUT,MUs,MUtw,MUsw] = viscosidades(MUtin,MUsin,MUtout,MUsout,Tw,Ttin,Ttout,
Tsin,Tsout,ROt,ROs)
2 %Obtención de las viscosidades a la temperatura de la pared del tubo, Tw, a
3 %partir de las viscosidades a la temperatura de entrada y de salida
4 %paso de cP a cSt (viscosidad cinemática)
5 vtin=MUtin*10^3/ROt;
6 vtout=MUtout*10^3/ROt;
7 vsin=MUsin*10^3/ROs;
8 vsout=MUsout*10^3/ROs;
9 %log10(log10(v+0.7))=A-B*log10(T)
10 %constantes para los dos fluidos
11 Bt=(log10(log10(vtout+0.7))-log10(log10(vtin+0.7)))/(log10(Ttin)-log10(Ttout));
12 At=log10(log10(vtin+0.7))+Bt*log10(Ttin);
13 Bs=(log10(log10(vsout+0.7))-log10(log10(vsin+0.7)))/(log10(Tsin)-log10(Tsout));
14 As=log10(log10(vsin+0.7))+Bs*log10(Tsin);
15 Tt=(Ttin+Ttout)/2;
16 Ts=(Tsin+Tsout)/2;
17 vt=10^(10^(At-Bt*log10(Tt)))-0.7;
18 vs=10^(10^(As-Bs*log10(Ts)))-0.7;
19 vtw=10^(10^(At-Bt*log10(Tw)))-0.7;
20 vsw=10^(10^(As-Bs*log10(Tw)))-0.7;
21 MUT=real(vt*ROt*10^-3);
22 MUtw=real(vtw*ROt*10^-3);
23 MUs=real(vs*ROs*10^-3);
24 MUsw=real(vsw*ROs*10^-3);
25 end

```

---

**ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB**

---

```
1 function [m1 m2] = parametrosm(tablacoefm,bundletype)
2 %obtiene los parámetros m1 y m2 en función de bundletype
3 % bundletype contiene la forma del intercambiador siendo:
4 %fixed or U-tube=1,outside packing=2,split-ring=3,pull-through=4
5 m1=tablacoefm(bundletype,1);
6 m2=tablacoefm(bundletype,2);
7 end
```

ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB

---

```
1 function [a1,a2,a3,a4,b1,b2,b3,b4] = parametrostablal(Res,angle,tablacoeff1)
2 %Obtiene los parámetros de a1, a2, a3, a4, b1, b2, b3 y b4 en función del
3 %Res(shell Reynolds) y el layout angle
4 if Res>=10^4
5     i=1;
6 else if Res>=10^3
7     i=2;
8     else if Res>=10^2
9         i=3;
10        else if Res>10
11            i=4;
12            else
13                i=5;
14            end
15        end
16    end
17 end
18 p=tablacoeff1(5*(angle-1)+i,:);
19 a1=p(1);
20 a2=p(2);
21 a3=p(3);
22 a4=p(4);
23 b1=p(5);
24 b2=p(6);
25 b3=p(7);
26 b4=p(8);
27 end
```

---

**ANEXO. CÓDIGO DE LAS APLICACIONES DE MATLAB**

---

```
1 function [K1,n] = parametrosttabla2(layout,tablacoef2,Ntp)
2 %obtiene los parámetros K1 y n en función del número de pasos y el layout
3 %de los tubos
4 K1=tablacoef2(fix(Ntp/2)+1,layout(1));
5 n=tablacoef2(fix(Ntp/2)+1,layout(1)+2);
6 end
```



---

## REFERENCIAS

- [1] R. Shah y D. Sekulic, *Fundamentals of Heat Exchanger Design*, New York: John & Wiley, 2003.
- [2] G. Walger, «Crocoolers,» New York, Plenum Press, 1983.
- [3] A. Fraas y M. Ozisik, *Heat Exchanger Design*, New York: John Wiley & Sons, 1965.
- [4] Tubular exchanger manufacturers association, INC., *Standards of the tubular exchanger manufacturers association*, 9th ed., Tarrytown, New York, 2009.
- [5] American Petroleum Institute, *API Standard 660, Shell and Tube Heat Exchangers- for Petroleum and Natural Gas Industries*, 7th ed., Washington, DC, 2003.
- [6] R. Shah and D. Sekulic, "Heat exchangers," in *Handbook of Heat Transfer Applications*, 3rd ed., W. H. J. a. G. E. Rohsenow, Ed., New York, McGraw-Hill, 1998, pp. 17.1-17.169.
- [7] C. Drake y J. Carp, «Shell and tube heat exchangers,» *Chem. Eng.*, vol. 67, nº 8, pp. 165-170, 1960.
- [8] R. Lord, P. Minton y R. Slusser, *Design of heat exchangers*, New York: McGraw Hill, 1970.
- [9] E. Saunders, «Features relating to thermal design,» de *Heat Exchanger Design Handbook*, vol. 4, Washington, D.C., Hemisphere, 1983.
- [10] P. Phadke, «Determining tube counts for shell and tube exchangers,» *Chem. Eng.*, pp. 65-68, sept. 1984.
- [11] J. Taborek, «Shell and tube heat exchanger design-Extension of the method to other shell, baffle, and tube bundle geometries,» de *Heat Exchanger Design Handbook*, vol. 3, Washington, D.C., Hemisphere, 1983.
- [12] T. Spencer, «Mechanical design and fabrication of exchangers in the United States,» de *Heat Transfer Engineering*, vol. 8, 1987, pp. 58-61.
- [13] A. Larowski y M. Taylor, de *Systematic Procedures for Selection of Heat Exchangers*, London, U.K., Institution of Mechanical Engineers, 1982, pp. 32-56.





## DISEÑO BAJO NORMA TEMA DE INTERCAMBIADORES TUBO-CARCASA

- 
- [14] G. Gutterman, «Specify the right heat exchanger,» de *Hydrocarbon Process*, April, 1980, pp. 161-163.
- [15] K. P. Singh y A. Soler, *Mechanical Design of Heat Exchangers and Pressure Vessel Components*, Cherry Hill, NJ: Arcturus Publishers, 1984.
- [16] E. Schulunder, «Mechanical design codes,» de *Heat Exchanger Design Handbook*, vol. 4, Washington, DC, Hemisphere, 1983.
- [17] T. Thulukkanam, *Heat Exchanger Design Handbook*, 2nd ed., CRC Press, 2013.
- [18] D. L. Gulley, «How to figure true temperature difference in shell and tube exchangers,» *The Oil and Gas Journal*, pp. 108-114, September 14, 1964.
- [19] A. Kraus, «Heat Transfer Handbook,» John Wiley & Sons, 2003, pp. 797-911.
- [20] D. Kern, *Process Heat Transfer*, New York: McGraw-Hill, 1950.
- [21] R. W. Serth y T. G. Lestina, *Process Heat Transfer: Principles, Applications and Rules of Thumb*, Academic Press, 2007.
- [22] R. Sinnott, «An introduction to Chemical Engineering Design,» de *Chemical Engineering Series*, vol. 6, J. Coulson y J. Richardson, Edits., Oxford, U.K., Pergamon Press, 1989.
- [23] C. J. Seeton, «Viscosity-temperature correlation for liquids,» *Tribology Letters*, vol. 22, pp. 67-78, April 2006.
- [24] E. Sieder y G. Tate, «Heat transfer and pressure drop of liquids in tubes,» *Ind.Eng.Chem*, nº 28, pp. 1429-1435, 1936.
- [25] W. McAdams, *Heat Transmission*, 3rd ed., New York: McGraw-Hill, 1954.
- [26] K. Bell, «Delaware method for shellside design,» de *Heat Exchangers-Thermal Hydraulic Fundamentals and Design*, Washington, DC, Hemisphere/McGraw-Hill, 1981, pp. 581-618.
- [27] K. Bell, «Delaware method for shellside design,» de *Heat Transfer Equipment Design*, Washington, DC, Hemisphere, 1988, pp. 145-166.
- [28] J. Palen y J. Taborek, «Solution of shellside flow, pressure drop and heat transfer by stream analysis method,» *Chem. Eng.*, nº 92, pp. 53-63, 1969.



## DISEÑO BAJO NORMA TEMA DE INTERCAMBIADORES TUBO-CARCASA

- 
- [29] T. Tinker, «Shellside characteristics of shell and tube heat exchangers-A simplified rating system for commercial heat exchangers,» *ASME*, nº 80, 1958.
- [30] K. Bell, «Final report of the cooperative research program on shell and tube heat exchangers,» University of Delaware Engineering Experiment Station, New York, June 1963.
- [31] K. Muralikrishna y U. Shenoy, «Heat exchanger design targets for minimum area and cost,» *Chemical Engineering*, nº 78, pp. 161-167, 2000.
- [32] M. Serna-González, J. M. Ponce-Ortega, A. J. Castro-Montoya y A. Jiménez-Gutiérrez, «Feasible Design Space for Shell-and-Tube Heat Exchangers Using the Bell-Delaware Method,» *Ind. Eng. Chem*, nº 46, pp. 143-155, 2007.
- [33] F. Jegede y G. Polley, «Optimum heat exchanger design,» *Trans Inst Chem Eng, Chem Eng Res Des*, pp. 133-141, 1992.



# GLOSARIO DE TÉRMINOS

$\mu$	viscosidad del fluido, cP
$\mu_w$	viscosidad del fluido a la temperatura de la pared, cP
A	área de intercambio de calor, m <sup>2</sup>
a, a <sub>1</sub> , a <sub>2</sub>	constantes para el cálculo de $j_{si}$ y $f_{si}$
A, B	parámetros para el cálculo de la viscosidad cinemática en función de la temperatura
ac	parámetro para el cálculo de C <sub>1</sub>
A <sub>f</sub>	factor de anualización del coste inicial, año <sup>-1</sup>
b, b <sub>1</sub> , b <sub>2</sub>	constantes para el cálculo de c <sub>p</sub>
Bc	corte del deflector en porcentaje del diámetro de la carcasa
c	constante exponencial para el coste de adquisición del intercambiador
C <sub>1</sub> , C <sub>2</sub>	parámetros para el cálculo de $\Delta P_t$
C <sub>10</sub>	parámetro para el cálculo de la ecuación (5.3.1c)
C <sub>3</sub>	parámetro para el cálculo de $\Delta P_s$
C <sub>4</sub>	parámetro para el cálculo de h <sub>s</sub>
C <sub>5</sub> , C <sub>7</sub>	parámetros para el cálculo de las ecuaciones (5.3.1)
C <sub>6</sub>	parámetro para el cálculo de la ecuación (5.3.1a)
C <sub>8</sub> , C <sub>9</sub>	parámetros para el cálculo de la ecuación (5.3.1b)
C <sub>a</sub> , C <sub>b</sub>	constantes para el cálculo del coste de adquisición del intercambiador, \$
C <sub>e</sub> , C <sub>f</sub>	constantes para el cálculo del coste de adquisición de las bombas, \$
c <sub>h</sub>	parámetro para el cálculo de K <sub>S4</sub>
C <sub>J</sub> , C <sub>R</sub>	parámetros para el cálculo de J <sub>b</sub> y R <sub>b</sub>
c <sub>p</sub>	parámetro para el cálculo de K <sub>S2</sub>



## DISEÑO BAJO NORMA TEMA DE INTERCAMBIADORES TUBO-CARCASA

---

$c_{p,s}$	capacidad calorífica del fluido, J/kg K
$C_{pow}$	coste energético, \$/Wh
$D, D_t$	diámetro exterior de los tubos, mm
$D_{ctl}$	diámetro de la circunferencia que pasa por los centros de los tubos exteriores del haz de tubos, mm
$D_{otl}$	diámetro de la circunferencia que circunscribe el haz de tubos, mm
$D_s$	diámetro interior de la carcasa, mm
$D_{ti}$	diámetro interior de los tubos, mm
$D_w$	diámetro hidráulico equivalente para ventana de deflector segmentado, mm
$F$	factor de corrección de la temperatura media logarítmica
$f$	factor de fricción
$F_c$	fracción de tubos que se encuentran en flujo perpendicular
$f_{si}$	factor de fricción en la carcasa para un haz de tubos ideal
$F_w$	fracción de tubos que atraviesan la ventana del deflector
$g$	constante exponencial para el coste de adquisición de las bombas
$H$	tiempo de funcionamiento anual, h/año
$h$	coeficiente de convección del fluido, W/m <sup>2</sup> K
$h_{si}$	coeficiente de convección del fluido de la carcasa en un haz de tubos ideal, W/m <sup>2</sup> k
$J_b$	factor de corrección del flujo entre el haz de tubos y la carcasa para la transferencia de calor
$J_c$	factor de corrección de flujo por la ventana de los deflectores para la transferencia de calor
$J_l$	factor de corrección de las fugas en los deflectores para la transferencia de calor
$J_r$	factor de corrección de flujo laminar para la transferencia de calor



## DISEÑO BAJO NORMA TEMA DE INTERCAMBIADORES TUBO-CARCASA

$J_s$	factor de corrección de la separación desigual de los deflectores para la transferencia de calor
$j_{si}$	coeficiente térmico para el cálculo de $h_{si}$
$J_{tot}$	producto de todos los factores de corrección para la transferencia de calor
$K_1, n$	constantes de la ecuación de Sinnott
$k_1', k_2', k_3'$	parámetros para el cálculo de $K_{S3}$
$K_{S1}, K_{S2}$	parámetros para el cálculo de $K_{S3}$
$K_{S3}$	parámetro para el cálculo de $C_3$
$K_{S4}$	parámetro para el cálculo de $C_4$
$k_w$	conductividad térmica de los tubos, W/m K
$L_{bb}$	holgura entre el haz de tubos y la carcasa, mm
$L_{bc}$	separación entre los deflectores centrales, mm
$L_{bi}$	separación del deflector de entrada, mm
$L_{bo}$	separación del deflector de salida, mm
$L_i$	relación entre la separación de los deflectores a la entrada y la separación entre los centrales
LMTD	diferencia de temperatura media logarítmica, °C
$L_o$	relación entre la separación de los deflectores a la salida y la separación entre los centrales
$L_{pp}$	separación de los tubos en la dirección paralela al flujo, mm
$L_{ta}$	longitud de los tubos en la que se produce transferencia de calor, mm
$L_{tp}$	separación de los tubos, <i>tube pitch</i> , mm
$L_{tp,eff}$	separación de los tubos respecto a la dirección de la corriente, mm
$L_{ts}$	espesor de la placa de tubos, mm
$L_{tt}$	longitud total de los tubos, mm



## DISEÑO BAJO NORMA TEMA DE INTERCAMBIADORES TUBO-CARCASA

---

$m, M$	flujo másico, kg/s
$m_1, m_2, m_3$	constantes para el cálculo del número de tubos
$m_t, K_t$	parámetros para el cálculo del factor de fricción
$N_b$	número de deflectores
$N_{ct}$	número de filas de tubos cruzadas en todo el intercambiador
$N_s$	número de pasos por la carcasa
$N_{ss}$	número de pares de tiras de sellado, <i>sealing strips</i>
$N_t, N_{tt}$	número de tubos
$N_{tcc}$	número de filas de tubos en flujo perpendicular real en una sección
$N_{tcw}$	número de filas de tubos en la ventana del deflector
$N_{tp}$	número de pasos por los tubos
$N_{tw}$	número de tubos que atraviesan la ventana del deflector
$p$	parámetro para el cálculo de $R_i$
$Pr$	número de Prandtl
$Q$	potencia térmica del intercambiador, W
$R_b$	factor de corrección del flujo entre el haz de tubos y la carcasa para la pérdida de carga
$R_{bs}$	relación entre la separación de los deflectores centrales y el diámetro de la carcasa
$Re$	número de Reynolds del fluido
$R_f$	factor de ensuciamiento, <i>fouling</i> , $m^2\text{°C}/W$
$R_l$	factor de corrección de las fugas en los deflectores para la pérdida de carga
$r_l, r_s$	relaciones de áreas utilizadas para el cálculo de $R_l$ y $J_l$
$R_p$	parámetro para el cálculo de $K_{S3}$



## DISEÑO BAJO NORMA TEMA DE INTERCAMBIADORES TUBO-CARCASA

---

$R_s$	factor de corrección de la separación desigual de los deflectores para la pérdida de carga
$r_{ss}$	relación entre el número de pares de tiras de sellado y el número de filas de tubos en flujo perpendicular
$S_b$	área entre la carcasa y el haz de tubos
$S_m$	área mínima de paso existente entre dos deflectores consecutivos, en la que el flujo es perpendicular a los tubos
$S_{sb}$	área entre la carcasa y los deflectores, $m^2$
$S_{tb}$	área entre los tubos y los deflectores, $m^2$
$S_w$	área de paso neta en la ventana del deflector, $m^2$
$S_{wg}$	área de la ventana del deflector, $m^2$
$S_{wt}$	área de la ventana del deflector ocupada por los tubos, $m^2$
$T_{av}$	temperatura media del fluido, $^{\circ}C$
$T_w$	temperatura de la pared de los tubos, $^{\circ}C$
$v$	velocidad del fluido, $m/s$
$v_s^*$	velocidad de partida del fluido en la carcasa, $m/s$
$\Delta P_{bi}$	pérdida de carga en el flujo perpendicular en un haz de tubos ideal, Pa
$\Delta P_s$	pérdida de carga en la carcasa, Pa
$\Delta P_t$	pérdida de carga en los tubos, Pa
$\Delta P_{wi}$	pérdida de carga en la ventana del deflector en un haz de tubos ideal, Pa
$\delta_{sb}$	holgura entre la carcasa y el deflector, mm
$\delta_{tb}$	holgura entre los tubos y el deflector, mm
$\eta$	rendimiento de las bombas
$\theta_{ctl}$	ángulo subtendido por el corte de deflector y el diámetro que atraviesa los centros de los tubos más externos del haz de tubos, deg.